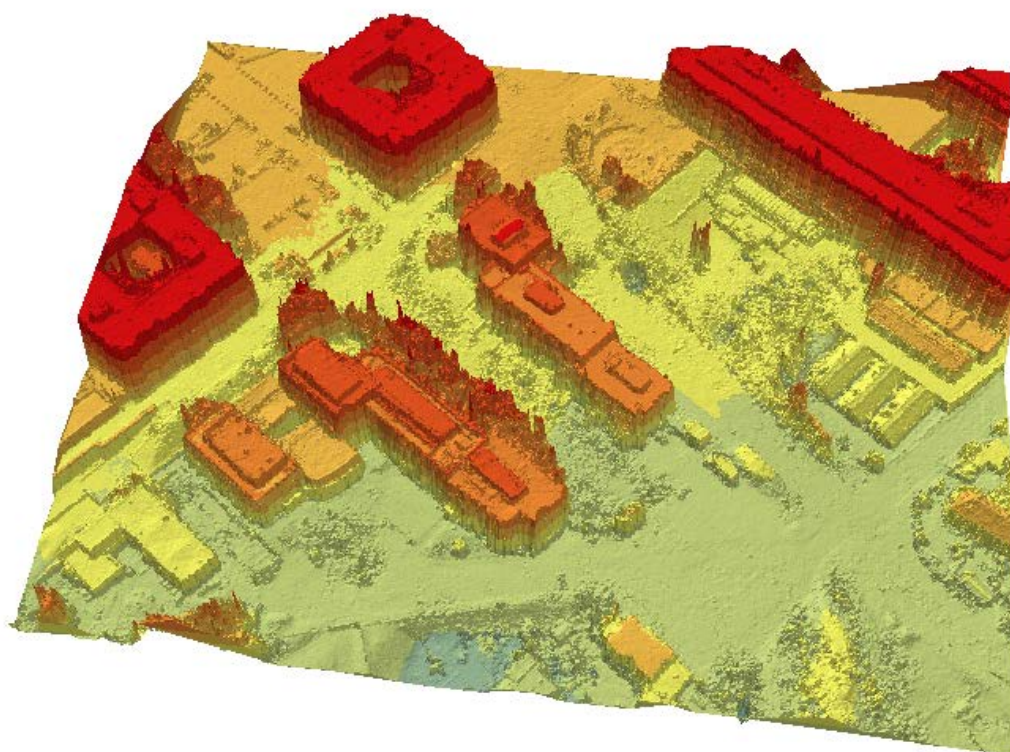


Masteroppgave, Institutt for geofag

Undersøkelse av høydedata fra tett matching av flybilder

Andreas Woxholtt



UNIVERSITETET I OSLO

DET MATEMATISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

Undersøkelse av høydedata fra tett matching av flybilder

Andreas Woxholt



Masteroppgave i geofag

Studieretning: Naturgeografi, hydrologi og geomatikk

Institutt for geofag

Matematisk-naturvitenskaplig fakultet

UNIVERSITETET I OSLO

03.06.2013

© **Andreas Woxholtt, 2013**

Veiledere: Trond Eiken (Universitetet i Oslo) og Bjørn Barstad (TerraTec AS)

Dette eksamensarbeidet er publisert elektronisk i DUO – Digitale Utgivelser ved UiO

<http://www.duo.uio.no>

Det er også katalogisert i BIBSYS (<http://www.bibsys.no/>)

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted, in any form or by any means, without permission.

Sammendrag

I denne oppgaven undersøkes digitale høydedata generert ved såkalt tett matching av flyfotografier. Bakgrunnen er nylig utviklede matchealgoritmer som kan produsere høydedata med meget høy punkttetthet. I oppgaven blir høydedata generert fra flyfotografier med lav GSD (*ground sample distance*) og høy bildeoverlapp, ved hjelp av programmet Match T DSM (v. 5.5) fra Inpho GmbH.

Teori angående fotogrammetri og bildematching, m.m., blir gjennomgått. For å undersøke kvaliteten på de genererte høydedataene benyttes både kvantitative og kvalitative metoder. Bl.a. undersøkes fullstendighet ved beregning av lokal punkttetthet. Den vertikale nøyaktigheten blir undersøkt ved kontroll mot kontrollpunkter etablert vha. GNSS. I tillegg utføres en undersøkelse av relativ høydenøyaktighet vha. sammenlikning mot data fra laserskanning. Bildeoverlappens betydning for resultatene blir også undersøkt, og det blir gjort endel observasjoner av hvordan ulike overflatetyper modelleres i høydedataene. Det gjøres også en vurdering av hvorvidt disse dataene er anvendelig i automatisert produksjon av såkalte sanne ortofoto.

Resultatene av undersøkelsene viser at tett bildematching kan generere høydedata med punkttetthet omtrent tilsvarende bildenes GSD (som i dette tilfellet er ca. 6.5-7 cm). Det er imidlertid grunn til å spørre om den reelle punkttettheten, dvs. tettheten av faktiske høydemålinger, kan være noe lavere enn tettheten til utdataene. Sammenheng mellom høy bildeoverlapp og fravær av hull i datadekningen, som følge av økt innsyn, vises. Imidlertid blir det også vist at økt bildeoverlapp ikke nødvendigvis gir flere produserte punkter dersom bildene som matches ikke er fotografert noenlunde samtidig. Det blir funnet absolutt høydenøyaktighet i samme størrelsesorden som GSD. Det blir imidlertid også vist at partier i bildene med dårlige forhold for bildematching (skyggepartier) kan gi svake resultater. Resultatene tyder på at den vertikale stedfestingskvaliteten til høydedata fra tett bildematching jevnt over er noe svakere enn tilsvarende fra laserskanning. Feil i dataene gjør automatisert produksjon av sanne ortofoto med god kvalitet problematisk. Selv om data fra tett bildematching nok krever endel bearbeiding før de kan anvendes, er det liten grunn til å tvile på metodens effektivitet. For programvaren benyttet i undersøkelsen synes effektivitet imidlertid å være prioritert i den grad at det går på bekostning av dataenes høydenøyaktighet.

Abstract

In this thesis digital elevation data generated by dense matching of aerial imagery is investigated. The background for the thesis is the recent development of matching algorithms able to produce elevation data with very high density. In the thesis elevation data is generated with low-GSD (*ground sample distance*) aerial images as input into the software Match-T DSM (v. 5.5) from Inpho GmbH.

Theory regarding photogrammetry and image matching is presented. Both quantitative and qualitative methods are used to investigate the quality of the elevation data. Completeness of the data sets is investigated by calculations of local point density. Vertical accuracy is investigated by way of control points from GNSS. In addition, relative height accuracy is investigated with laser scanning data as reference. The influence of image overlap is examined. The modelling of different surfaces is observed. Also, the potential for generation of so-called true orthophotos with these data is evaluated.

The results show that elevation data with point density approximately corresponding to image GSD (6.5-7 cm in this case) can be generated by dense image matching. There is however reason to question whether the actual point density, i.e. the density of height measurements, might be somewhat lower than the density of the output data. High image overlap is observed to reduce the amount of holes in the datasets, due to fewer occlusions. However, it is shown that increase of image overlap does not necessarily result in higher completeness if the matched images are not photographed approximately at the same time. The absolute height accuracy is shown to be of the same order as image GSD. Areas where matching is difficult (shadow areas) are shown to produce results of lower accuracy. The results indicate that the vertical quality of elevation data from dense image matching on average is lower than the one provided by laser scanning. Errors in the data make automated generation of true orthophotos of good quality difficult. Though the data from dense image matching seem to need post-processing to be of use, there is little reason to doubt the efficiency of the method. For the software used in this investigation, high efficiency looks to be prioritized over the vertical accuracy of the product.

Innhold

1	Innledning	1
2	Teori og bakgrunn	3
2.1	Digitale høydedata	3
2.2	Fotogrammetrisk grunnlag	5
2.2.1	Fotogrammetri – kort introduksjon	5
2.2.2	Flyfotografering – og noen av fotografiets geometriske egen- skaper	5
2.2.3	Digitale kameraer og digitale bilder	9
2.2.4	Prosessering og orientering	10
2.3	Bildematching	11
2.3.1	Problem, prosess, sentrale begreper	11
2.3.2	Parallaksemålinger og epipolar geometri	13
2.3.3	Arealbasert matching	14
	Korrelasjonsmatching	14
	Minste kvadrats matching:	15
2.3.4	Objektbasert matching	16
2.3.5	Matching av enkeltpiksler	18
	Dynamisk programmering	19
	Semi-Global Matching	21
2.3.6	Hierarkisk matching	23
2.4	Tidligere tester av høydemodeller fremstilt ved tett matching av flyfotografier	24
2.5	Flybåren laserskanning – en kort presentasjon av teknologien, og sammenlikning med fotogrammetri	25
2.6	Ortofoto og sanne ortofoto	27
3	Metodikk, data, programvare, maskinvare	31
3.1	Om metodikk	31
3.1.1	Oppgavens hovedtemaer og undersøkelser	31
3.1.2	Spesielle hensyn ved kvantitative nøyaktighetsundersøkelser av digitale høydedata	35
3.2	Data: flyfotografier	37
3.2.1	Drammen	37
3.2.2	Oslo	38
3.3	Referansedata: punktskyer fra laserskanning	40

3.3.1	Drammen	40
3.3.2	Oslo	41
3.4	Referansedata: GNSS-målte kontrollpunkter	41
3.5	Programvare: Match-T DSM	42
3.6	Annen benyttet programvare	46
3.6.1	ArcGIS	46
3.6.2	Image Station	46
3.6.3	OrthoMaster og OrthoVista	46
3.7	Maskinvare	46
4	Undersøkelser og resultater	47
4.1	Effektene av ulike bildekonfigurasjoner over et lite testområde	47
4.2	Fullstendighet og punkttetthet	52
4.2.1	Drammen sentrum	53
4.2.2	Oslo sentrum	55
4.3	Absolutt høydenøyaktighet	60
4.4	Relativ høydenøyaktighet – sammenlikning med høydedata fra laserskanning	63
4.5	Modellering av enkle overflater	68
4.6	Modellering av bygninger	72
4.7	Modellering av trær	78
4.8	Fremstilling av sanne ortofoto	79
5	Oppsummering og diskusjon	84
5.1	Oppsummering og diskusjon av resultater	84
5.1.1	Punkttetthet og fullstendighet	84
5.1.2	Punktenes kvalitet	85
5.1.3	Tett bildematching versus laserskanning	87
5.1.4	Egnethet i produksjon av sanne ortofoto	88
5.2	Generelle betraktninger om høydedata fra tett bildematching	89
6	Konklusjon	91
7	Appendiks	92
	Referanser	94
	Forkortelser og uttrykk	98

Figurer

1	DTM/DOM	4
2	Hybridmodell	4
3	Flytskjema, fotogrammetrisk DHM-fremstilling.	5
4	Radiell forskyvning	7
5	Parallakse-illustrasjon	8
6	Epipolart plan og epipolare linjer	13
7	Eksempel på matching av testbilder	15
8	Minste kvadrats matching	17
9	Eksempel på objektekstrahering	18
10	Illustrasjon av problemområde for vindu- og korrelasjonsbasert matching	19
11	Ulikhetsmatrise	20
12	Matchesekvens gjennom kostmatrise i dynamisk programmering . . .	21
13	Prinsipp for aggregering av kostnader i semi-global matching	22
14	Hierarkisk grov-til-fin-teknikk	23
15	Konvensjonelt ortofoto og sant ortofoto	30
16	Vertikale avvik Δh som funksjon av planimetriske avvik Δv og terrenghelning α	36
17	Testområde Drammen sentrum	38
18	Testområde Blindern-Majorstuen	39
19	Testområde Oslo sentrum	40
20	Ortofoto og laserpunktsky, Marienlyst kunstgress	47
21	Oversikt over bilder som dekker Marienlyst kunstgress	48
22	Punktskyer fra bildematching, Marienlyst kunstgress	50
23	Plott av profillinjer for M2-, M6- og laser-DOM.	51
24	3D-visualisering av punktsky, der punktene er gitt farger fra bildene som inngikk i matchingen. Drammen sentrum omkring Bragernes torg.	52
25	Punkttetthet for punktskyen DS	55
26	Eksempel på hull i punktskyen DS6020	56
27	Eksempler på hull i punktskyen OSS8040	58
28	Eksempler på hull i punktskyen OSS8040	58
29	Eksempler på hull i laserpunktskyen som dekker Oslo	59
30	Histogram for avvik Δh ved GNSS-kontroll av punktskyer fra bildematching og laserskanning	62
31	Vertikale avvik mellom DOM fra laserskanning og DOM fra stereo- matching (punktsky OS).	64

32	Punktskyene BM, BMS og BM6040, Marienlyst kunstgress	69
33	Ortofoto og punktsky, Youngstorget	70
34	To eksempler på overflater med god tekstur som gir gode matchere- sultater, samt profil	71
35	Trappeeffekt i teksturfattige, hellende overflater, slottsplassen i Oslo .	72
36	Privathus i Drammen, gjengitt i ortofoto samt punktskyer fra bildematching og laserskanning	73
37	Privathus i Drammen, gjengitt i ortofoto og punktsky fra bildematching	74
38	Ortofotomosaikk og punktsky som viser bygård i Oslo sentrum	76
39	Profil av punktskyer som viser bygård i Oslo	77
40	Bygård i Oslo sentrum; detalj fra punktsky OS og laserpunktsky . . .	77
41	Tremodellering; profil gjennom punktsky BM og laserpunktsky	78
42	Punktsky og sant ortofoto fra Drammen sentrum	80
43	Punktsky og sant ortofoto fra testfelt Blindern-Majorstuen	82
44	Punktsky og sann ortofotomosaikk som viser krysset mellom Akers- gata og Grensen i testfelt Oslo sentrum	83

Tabeller

1	Marienlyst kunstgress, resultater av matching mellom to bilder. . . .	48
2	Marienlyst kunstgress, resultater av matching mellom flere bilder . .	49
3	Statistikk for DOM-profillinjer langs Marienlyst kunstgress	51
4	Data for punktskyer, testfelt Drammen sentrum.	53
5	Statistikk for punkttetthet ved matching med ulik bildeoverlapp, testområde Drammen sentrum	54
6	Data for punktskyer, testfelt Oslo sentrum.	56
7	Statistikk for punkttetthet ved matching med ulik bildeoverlapp, testområde Oslo sentrum	57
8	Data for punktskyer, testfelt Blindern-Majorstuen.	60
9	Høydenøyaktighet for tre punktskyer generert vha. bildematching samt punktsky fra laserskanning	61
10	Høydepresisjon etter justering tilsvarende median for tre punktskyer generert vha. bildematching samt punktsky fra laserskanning	62
11	Avvik mellom laserpunktskyer og punktskyer generert ved bilde- matching over grøntområder	65
12	Avvik mellom laserpunktskyer og punktskyer generert ved bilde- matching over veier og andre asfalterte overflater uten skygge	66
13	Avvik mellom laserpunktskyer og punktskyer generert ved bilde- matching over veier og andre asfalterte overflater i skygge	66
14	Avvik mellom laserpunktskyer og punktskyer generert ved bilde- matching over skrå takflater med god tekstur	67
15	Avvik mellom laserpunktskyer og punktskyer generert ved bilde- matching over skrå takflater med lite tekstur	68

Forord

Denne oppgaven inngår som en del av Master in Geosciences ved Universitetet i Oslo, Institutt for Geofag.

Jeg vil takke mine dyktige veiledere Bjørn Barstad og Trond Eiken. De har begge vært til stor hjelp, og har vært tilgjengelige for spørsmål ved nærmest enhver anledning. Bjørn skal ha stor takk for å ha funnet et interessant tema for oppgaven, mens Tronds innsats var uunnværlig da GNSS-kontrollpunkter skulle etableres.

Takk til plan- og bygningsetatene ved Drammen og Oslo kommune, som har gitt meg tillatelse til å bruke deres data i denne oppgaven. Takk også til Anders Nesse ved Norconsult AS for å ha lånt meg lisenser til Match-T DSM.

Jeg vil også takke Svein Harald Friisk, Berit Morstad, Zaklina Szadkowska og Olav Gaute Ytterdal, alle ved TerraTec AS, for teknisk hjelp og gode innspill. En takk også til Thomas Risch ved TerraTec AS for å ha vist stor velvilje de gangene jeg ba om fri fra jobben for å kunne arbeide med oppgaven.

Takk også til mine medstudenter for faglig og ikke-fullt-så-faglig samvær de siste årene.

1 Innledning

Generering av høydemodeller ved bildematching er ingen ny teknologi, og har vært i praktisk bruk i alle fall siden begynnelsen av 1990-tallet. Svært enkelt forklart går bildematching ut på å gjenfinne det samme objektet i to (fly)fotografier. Objektets plassering i de to bildene, samt kjennskap til kameraets posisjoner i fotograferingsøyeblikkene gjør det mulig å beregne objektets høyde relativt til et referanseplan. Hva man kan kalle tradisjonell bildematching produserte digitale høydemodeller ved matching av (skannede analoge) bildepar ved hjelp av teknikker utviklet på 1980- og 90-tallet. Da laserskanning kom på markedet for om lag 15 år siden, var det klart at denne teknologien produserte mer detaljerte, nøyaktige og anvendelige høydedata enn datidens fotogrammetriske matching. Laserskanning har derfor vært den foretrukne teknikken for innsamling av høydedata det seneste tiåret.

I løpet av de siste 15 årene har fotogrammetri-faget gjennomgått omfattende utvikling som bl.a. omfatter raskere datamaskiner, digitale sensorer og bilder, samt muligheter for høyere bildeoverlapp. I løpet av de siste årene har i tillegg programvare som er i stand til å produsere høydedata med meget høy punkttetthet blitt kommersielt tilgjengelig. Siden denne teknologien er såpass ny, er det ennå ikke godt kjent hvor gode data den er i stand til å produsere. Denne mangelen på kunnskap er problemet som motiverer denne masteroppgaven. Oppgaven søker å bidra til mer kunnskap om tett bildematching.

Temaene som blir forsøkt belyst er

- punkttetthet og fullstendighet i høydedata fra tett bildematching
- høydenøyaktighet
- avvik mellom høydedata fra tett bildematching og høydedata fra laserskanning, samt førstnevntes kvalitet sammenliknet med sistnevnte
- effekten av bildekonfigurasjon/bildeoverlapp på kvaliteten på høydedataene
- modellering av ulike overflatetyper i høydedata fra tett bildematching
- høydedataenes egnethet i automatisert produksjon av sanne ortofoto

Til generering av høydedata vil programmet Match-T DSM, versjon 5.5, fra Inpho GmbH benyttes. Programmet tilhører siste generasjon programvare for tett bildematching, og det kan forventes at kvaliteten på de digitale høydedataene som kan produseres med dette programmet langt på vei er representativ for tett bildematching generelt.

Av hensyn til oppgavens omfang omhandler den i liten grad hva som hender når den benyttede programvarens mange parametre varieres. I all hovedsak benyttes de parametre som anbefales for å generere så detaljerte og nøyaktige digitale høydedata som mulig. Ettersom det bør kunne forventes at meget høy overlapp mellom flyfotografiene gir de beste resultatene, og ettersom den høyeste bildeoverlappen tilgjengelig i dag dekker bymiljøer, benyttes datasett som dekker to byer, Drammen og Oslo.

Seksjon 2 av oppgaven tar for seg teori relatert til bildematching samt omstendigheter rundt bildematchingens ”renessanse”. Først omtales begreper, konsepter og teknologier som er forutsetninger for bildematching. Deretter gjennomgås temaet bildematching, først gjennom en generell introduksjon til temaet, før de etterfølgende underseksjonene tar for seg ulike matchealgoritmer. Seksjon 2.3.5 behandler relativt nye teknikker utviklet for å oppnå spesielt tett matching. Deretter omtales tidligere tester av digitale høydedata generert vha. tett bildematching. Ettersom laserskanning er ansett som den i øyeblikket ledende teknikken for fremstilling av digitale høydedata, og siden høydedata produsert ved laserskanning fungerer som et sammenlikningsgrunnlag i denne undersøkelsen, følger en kort introduksjon til denne teknologien. Siden de produserte digitale høydemodellene vil bli forsøkt benyttet til produksjon av sanne ortofoto, blir dette også redegjort for.

I seksjon 3 omtales metodene som anvendes i dette arbeidet. Videre presenteres data som fungerer som inndata i testene av bildematching, samt referansedata. I tillegg gis en presentasjon av programvaren som testes: Match-T DSM, samt annen programvare som ble benyttet i dette arbeidet.

I seksjon 4 utføres undersøkelser av høydedata fra tett bildematching, og resultatene av undersøkelsene blir presentert og vurdert.

I seksjon 5 gjengis og diskuteres de sentrale funnene i oppgaven. Resultatene sammenliknes med funn i andre undersøkelser, der det er mulig. I tillegg gjøres noen overordnede bemerkninger angående høydedata fra tett bildematching.

Deretter følger konklusjon, referanseliste samt en oversikt over forkortelser og uttrykk benyttet i oppgaven.

2 Teori og bakgrunn

2.1 Digitale høydedata

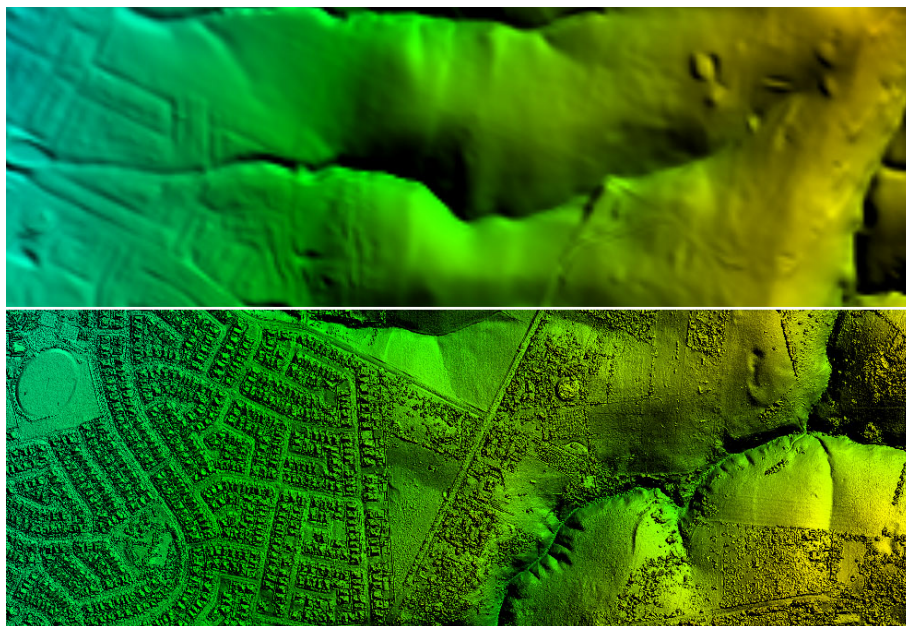
Digital høydemodell, DHM, er en betegnelse for digitale data som beskriver høydeforhold gjennom x- y- og z-koordinater. Den engelske ekvivalente termen er DEM (*Digital elevation model*). Ordet ”modell” indikerer at man har å gjøre med en overskuelig og derfor analyserbar forenkling av virkeligheten. I motsetning til en virkelig overflate er en DHM ikke kontinuerlig, da den består av en finitt mengde datapunkter, der høydeverdier opptrer som en tallverdi (relativt til et referanseplan) for et plankoordinatpunkt eller et areal. De fleste DHM’er er 2.5-dimensjonale, dvs. at det bare finnes én z-verdi eller h-verdi (høydeverdi) for hvert (x,y)-koordinatpar.

To termer som er nært beslektet med DHM er digital terrengmodell (DTM) og digital overflatemodell (DOM¹). Bruken av begrepene er ikke entydig i litteraturen, og varierer f.eks. mellom ulike gjeldende standarder fra Statens kartverk (Statens kartverk 2009, 2011b). I denne oppgaven vil begrepsbruken i mye av den engelskspråklige litteraturen (f.eks. Maune 2007) følges, der DHM er en generell (generisk) betegnelse for alle typer digitale topografiske data. DTM beskriver en terrengoverflate uten menneskeskapte objekter eller vegetasjon. DOM gjengir toppen av hustak, tre kroner og andre objekter hevet over den bare terrengoverflaten. Forskjellen er illustrert i figur 1.

Høydedata kan struktureres digitalt på en rekke måter: Det såkalte grid-/rutenettformatet utgjør i mye av litteraturen selve inkarnasjonen av digitale høydemodeller. En grid-DHM genereres vanligvis ved at punktmålinger av høyder, som gjerne er irregulært distribuert, interpoleres til et rutenett med regulær avstand mellom høydeverdiene. En grid-DHM kan bestå av en svært enkel datastruktur som utgjøres av en serie x- og y-(eller E- og N-)koordinater samt en høydeverdi for hver enkelt (x,y)-kombinasjon som utgjør sentrum i en rute/celle. Hver høydeverdi kan anses for å representere et areal, eller man kan tolke høydeverdiene i mellomrommene som et middel mellom to eller flere cellesentre. Den kanskje viktigste tekniske parameteren for grid-modeller er oppløsningen, dvs. avstanden mellom hver separate høydeverdi. For korrekt gjengivelse av en flat overflate er imidlertid oppløsningen ikke så vesentlig, siden overflatehøyden er ca. identisk for store arealer. Når det gjelder gjengivelsen av overflater med store høydevariasjoner, er imidlertid grid-oppløsningen av avgjørende betydning for høydemodellens evne til å gjengi virkeligheten.

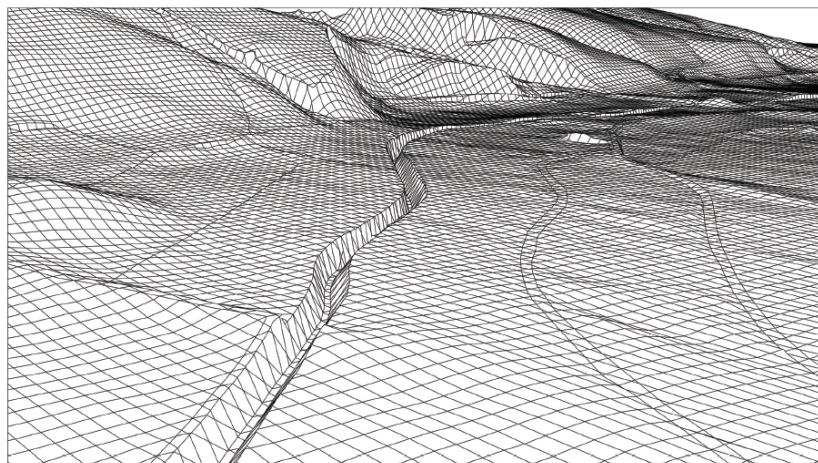
En mer komplisert datastruktur er triangulated irregular network (TIN). TIN’er

¹eng. DSM, digital surface model



Figur 1: Over: terrengmodell (DTM). Under: overflatemodell (DOM). Modifisert fra Aerometrex (2011).

er bygget ved å forbinde høydepunkter vha. triangler. I motsetning til grid-modeller er ikke punkttettheten fastlagt, noe som gjør det mulig å øke detaljnivået når overflaten er kompleks, mens overflater med lite variasjon kan modelleres med lav punkttetthet. Et eksempel på en såkalt hybridmodell er binærformatet SCOP, der jevn overflate representeres av et regulært grid, mens TIN-strukturer benyttes der det f.eks. er behov for abrupte overganger (såkalte knekklinjer) eller modellering av kompleks geomorfologi (Kraus & Otepka 2005). Et eksempel er gjengitt i figur 2.



Figur 2: Eksempel på hybridmodell med rutenett med innlagte knekklinjer. Figur hentet fra Kraus & Otepka (2005)

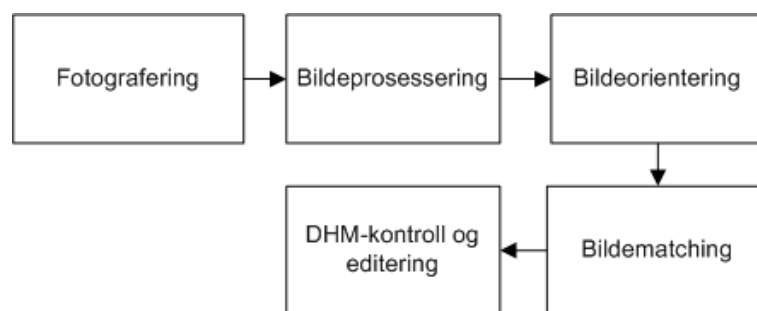
Ytterligere et format høydedata kan opptre i er såkalte punktskyer (*point*

clouds), som består av punkter definert ved x-, y- og h-koordinater, ofte uten noen regulær punktavstand i (x,y)-planet. I litteraturen – f.eks. i (Maune 2007) – omtales punktskyer normalt ikke som DHM'er, men ganske enkelt bare som punktskyer, selv om det i og for seg er semantisk forsvarlig å bruke termen DHM. Et velkjent punktsky-filformat er LAS-formatet, som ble utviklet av American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) primært for utveksling av data fra laserskanning. LAS-filer var lenge mer eller mindre synonymt med laserskanningsdata, men i den senere tiden har LAS-filer blitt en vanlig type utdata fra programvare for fotogrammetrisk matching. LAS-formatet er et kompakt, binært format, der forbindelser mellom punkter (topologi) ikke lagres. Derimot har formatet mulighet til å lagre klassifikasjonsinformasjon om punktene, noe som gjør det mulig å skille punkter definert som f.eks. vegetasjon og bebyggelse fra hverandre.

2.2 Fotogrammetrisk grunnlag

2.2.1 Fotogrammetri – kort introduksjon

”Fotogrammetri defineres som det å bestemme form, størrelse, beliggenhet og identitet av objekter ved å måle i bilder” (Andersen & Maalen Johansen 1998, s. 7). I løpet av de siste tiårene har fotogrammetrien gjennomgått en nær altomfattende digitaliseringsprosess, og i dagens fotogrammetri benyttes nærmest utelukkende digitale fotografier og arbeidsverktøy. Figur 3 viser forenklet hvordan den fotogrammetriske prosessen fra (fly)fotografering til DHM-generering forløper. Noen av elementene i prosessen vil bli omtalt umiddelbart, mens andre temaer blir behandlet utover i oppgaven.



Figur 3: Flytskjema, fotogrammetrisk DHM-fremstilling.

2.2.2 Flyfotografering – og noen av fotografiets geometriske egenskaper

Flyfotografier avfotograferes fra ett punkt (projeksjonssentrum) og har derfor såkalt sentralprojeksjon, noe som har viktige følger bl.a. for bildematching og

ortofotoproduksjon. Siden noen objekter/arealer er fjernere fra kameraet enn andre, vil målestokken variere i bildet. Målestokken varierer med terrenghøyden, men også med avstanden fra punktet på bakken rett under projeksjonssentrum (nadirpunktet). Samtidig vil vertikale flater lene seg bort fra nadirpunktet i eskalerende grad når avstanden til nadirpunktet øker. Dette kalles radiell forskyvning, og kan beregnes på følgende måte, i følge Andersen, Bråna & Lønnum (1991):

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta H}{H} \Rightarrow \Delta r = \frac{\Delta H}{H} \cdot r, \quad (1)$$

der

ΔR er radiell forskyvning i terrenget,

R er radiell avstand fra terrengnadir,

Δr er radiell forskyvning målt i flybildet,

r er radiell avstand fra bildenadir til toppen av objektet

ΔH er høydeskillet mellom toppen og bunnen av et objekt og

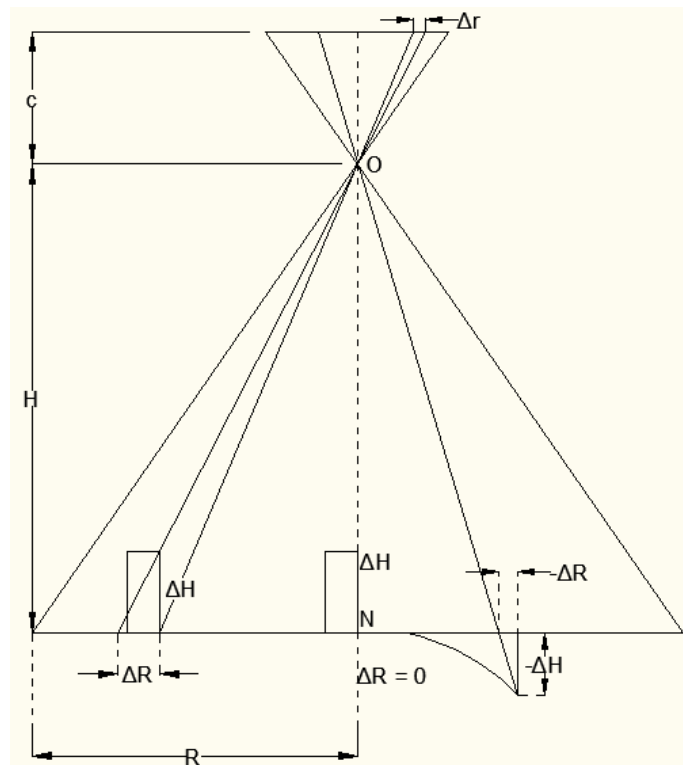
H er flyhøyde over referanseplanet.

Figur 4 illustrerer disse forholdene. I denne figuren markerer O projeksjonssenteret og c kamerakonstanten, ellers er forkortelsene tilsvarende formel 1.

Figur 4 henter også i retning av et annet trekk ved flyfotografier som avbilder høye bygninger, nemlig såkalt dødsvinkel. Fenomenet kalles *occlusion* på engelsk – okklusjon er også et gangbart norsk begrep som vil bli benyttet synonymt med dødsvinkel i det følgende. Høye bygninger, bratte skråninger, etc. vil skjule overflaten som befinner seg på ”baksiden” (relativt til nadirpunktet), og størrelsen på okklusjonen vil øke med avstanden til nadirpunktet. Smale gater eller gårds plasser mellom bygninger vil typisk være vanskelig tilgjengelige i flyfotografiene.

I kartleggingssammenheng foregår flyfotografering ved at man fotograferer stripevis, med en viss lengde- og sideoverdekkingsprosent. Overdekking – dvs. at punkter på bakken er avbildet i flere enn ett bilde – er en forutsetning for stereofotogrammetri, dvs. målinger både i grunnriss og høyde (Andersen et al. 1991). Ikke minst er overdekking en avgjørende forutsetning for bildematching. Da digital teknologi erstattet analoge bilder og film, samtidig som datalagringskapasiteten økte, fikk man muligheten til benytte høyere overdekningsprosent, og da særlig langs flystripene, uten at det medførte nevneverdige kostnadstillegg.

Parallakse er et begrep som det i denne sammenhengen er viktig å forklare, ettersom parallaksemålinger er en helt sentral bestanddel i bildematching. Begrepet parallakse betegner et objekts tilsynelatende forflytning som følge av endret observatørposisjon. Den vanligste måten å illustrere fenomenet på er menneskelig betraktning av et objekt med skiftvis venstre og høyre øye, men parallakse



Figur 4: Radiell forskyvning. $\Delta R = 0$ ved nadirpunkter (N) og øker med avstanden til N. Δr i bildet i bildet øker lineært med ΔR . Terrenget som befinner seg under referanseplanet på høyre side av N får negativ radiell forskyvning, dvs. innover i bildet. Figur lett modifisert fra Andersen et al. (1991).

forekommer også mellom overlappende flyfotografier. Hvis det foreløpig antas at parallaksen p mellom to flybilder bare forekommer langs én akse, er

$$p = x_{venstre} - x_{høyre}, \quad (2)$$

dvs. at parallaksen er avstanden mellom et objekts x-posisjon i hhv. venstre og høyre fotografi. Hvis man antar at objektet hvis parallakse man ønsker å måle befinner seg på referanseplanet, har vi, etter Mikhail, Bethel & McGlone (2001):

$$p = c \frac{B}{H}, \quad (3)$$

der

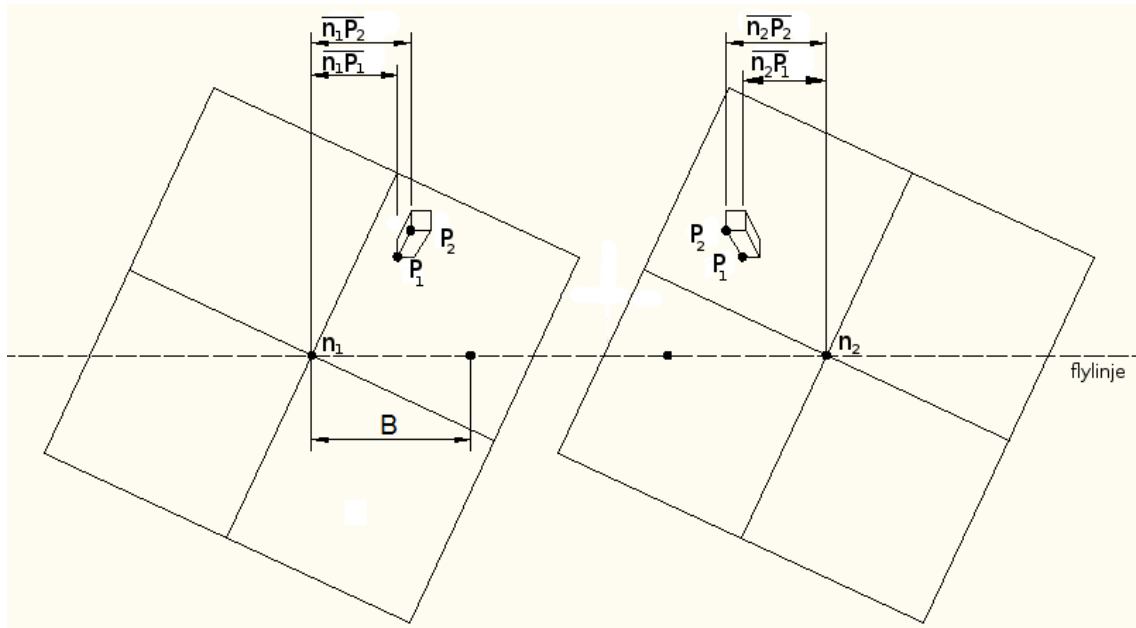
B er basis, dvs. avstanden mellom to eksponeringspunkter og H og c tilsvarende formel 1/figur 4.

Med andre ord er parallaksen proporsjonal med B/H , også kjent som basisforholdet eller basis/høydeforholdet.

Et viktig poeng er at punkter/objekter som befinner seg nær kameralinsen (som toppen av en bygning) får en større parallakse enn det som befinner seg lenger unna

(bakken ved foten av bygningen). Figur 5 viser to flyfotografier som inneholder den samme ”bygningen”, som i begge tilfellene lener seg bort fra bildesentrum. Hvis notasjonen i figur 5 benyttes, har vi

$$\begin{aligned} p_1 &= \overline{n_1 P_1} - (-\overline{n_2 P_1}), \\ p_2 &= \overline{n_1 P_2} - (-\overline{n_2 P_2}), \end{aligned} \quad (4)$$



Figur 5: Parallakse-illustrasjon. For oversiktens skyld er bildene tegnet ved siden av hverandre. B angir reell lengde på basis. Modifisert fra Mikhail et al. (2001).

Feil i denne typen parallaksemålinger σ_p vil medføre høydefeil σ_h etter følgende formel i McGlone et al. (2005). :

$$\sigma_h = \sigma_p \frac{H}{c} \frac{H}{B}. \quad (5)$$

Verdt å merke seg i denne formelen er at når basis B øker, synker σ_h hvis alle andre variabler holdes konstante. Lengden på basis er blant annet av betydning for kvaliteten på automatiske parallaksemålinger i bildematching.

Det må nevnes at situasjonen som har blitt beskrevet så langt er ideell og bare gjelder dersom parallaksen forekommer langs én akse. I praksis må man forholde seg til at skala og rotasjon i de to bildene ikke er identisk, noe som gir y-parallakse (vertikalparallakse) i tillegg til den allerede omtalte x-parallaksen (også kalt høydeparallakse eller horisontalparallakse). Der x-parallaksen er avstandsforskjeller til punkter målt parallelt med basis, er y-parallakse avstand mellom punkter målt vinkelrett på basis.

2.2.3 Digitale kameraer og digitale bilder

Drøyt ti år etter at digitale kameraer først ble introdusert i flyfotograferingssammenheng er analoge kameraer knapt nok lenger i profesjonell bruk. Analog film har blitt erstattet av CCD-sensorer og digital lagring, og dette har forbedret produktet og muliggjort automatisering av den videre bearbeidingen av bildene. Kjente storformat kameraserier er ADS fra Leica Geosystems, DMC fra Z/I Imaging og Ultracam fra Vexcel Imaging/Microsoft. I motsetning til analoge filmkameraer er digitale sensorer som regel rektangulære og er bredere på tvers av flyretningen for å begrense antall flystriper i et prosjekt. Sensorstørrelsen defineres i piksler – nyere digitale sensorer har gjerne >1.5 millioner piksler.

Arealet en piksel dekker på bakken, GSD (*ground sample distance*), kan beregnes etter følgende formel (Neumann 2008):

$$GSD = \frac{h_g}{c_k} \cdot CCDp, \quad (6)$$

der

h_g er flyhøyde over bakken,

c_k er fokallengde og

$CCDp$ er den fysiske størrelsen til hvert CCD-pikselelement.

Et talleksempel er gjengitt i seksjon 3.2.

Digitale bilder består av et antall rader og kolonner – et raster – med kvadratiske piksler, og hver piksel utgjøres av et tall som beskriver gråtoneverdi (lysintensitet). Bildets bitmengde beskriver hvor mange ulike verdier pikselet kan ha, og har også blitt betegnet som radiometrisk oppløsning. 8 bit gir $2^8 = 256$ ulike verdier, der 0 er svart og 255 er hvit. 12 bit gir $2^{12} = 4096$ ulike verdier, noe som øker både informasjonsinnhold i bildene og krav til lagringsplass. Fargebilder kan ha f.eks. $8 \cdot 3$ bit per piksel, for gjengivelse av fargene rød, grønn og blå. Den økte radiometriske oppløsningen var et betydelig fremskritt ved overgangen fra analoge til digitale bilder. Radiometrisk oppløsning er ikke minst av avgjørende betydning for bildematching, ettersom det må kunne skilles mellom ulike gråtoneverdier i homogene områder (f.eks. skygge og snø) for å unngå flertydighet i matchingen.

I analyse av digitale bilder, og i bildematching, benyttes ofte bildepyramider. Dette er en samling versjoner av et enkeltbilde, der hvert nivå i pyramiden har redusert oppløsning. Typisk reduseres oppløsningen ved at fire og fire piksler slås sammen, slik at en versjon av bildet på et nivå har en fjerdedel av størrelsen til versjonen på forrige nivå. Bruk av bildepyramider øker naturligvis størrelsen på en enkelt bildefil, men gjør det enklere å navigere og zoome i bildene.

2.2.4 Prosessering og orientering

Som vist i figur 3 må flybilder gjennom flere prosesser før bildematching kan utføres. Importering av bilder for digital bearbeidelse er en betraktelig enklere prosedyre for digitale bilder enn for analoge fotografier, siden førstnevnte ikke trenger å bli skannet. Vanligvis må de ”rå” digitale bildene gjennom dataprosessering der de ”bygges opp” til et endelig bilde, før det utføres radiometrisk normalisering/utjevning. Bildene påføres informasjon fra kamerakalibrering – som koordinater for bildehovedpunktet, kameraets brennvidde, objektivfortegning og koordinatsystem for kamerasensorene. De to førstnevnte variablene utgjør bildets indre orienteringselementer.

Formålet med ytre orientering er å etablere transformasjonsparametre mellom bildekoordinater og terrengkoordinater. Sammenhengen mellom disse er gitt ved det man kaller ”det perspektiviske sambandet”, som matematisk kan formuleres på følgende måte (Andersen 1994):

$$\begin{aligned} x_b &= -c \frac{a_{11}(x_T - x_0) + a_{12}(y_T - y_0) + a_{13}(z_T - z_0)}{a_{31}(x_T - x_0) + a_{32}(y_T - y_0) + a_{33}(z_T - z_0)}, \\ y_b &= -c \frac{a_{21}(x_T - x_0) + a_{22}(y_T - y_0) + a_{23}(z_T - z_0)}{a_{31}(x_T - x_0) + a_{32}(y_T - y_0) + a_{33}(z_T - z_0)}, \end{aligned} \quad (7)$$

der

x_T, y_T og z_T er terrengkoordinater,

x_b og y_b er bildekoordinatene,

x_0, y_0 og z_0 er koordinatene for projeksjonssenteret,

c er kamerakonstanten og

a_{ij} er elementer i en rotasjonsmatrise, A .

Bildets ytre orientering defineres ved projeksjonssenterets koordinater (x_0, y_0, z_0) og rotasjoner relativt til terrengets koordinatsystem (ϕ, ω, κ). Rotasjonsmatrisen A er en funksjon av de tre rotasjonene; ω og ϕ beskriver avvik fra loddrett fotografering, mens κ angir flyretningen (Andersen 1994).

Satelitt- og inertialnavigasjonssystemer (forkortet hhv. GNSS og INS) montert ombord under flygning utgjør også en viktig del av de senere års utvikling innen fotogrammetri. Når disse systemene benyttes til å bestemme koordinatene for fotograferingssituasjonen, får man tilnærmelser til ytre orienterings elementer. Disse tilnærmingene fungerer som inndata som forenkler den påfølgende aerotrianguleringen (AT). AT går ut på å finne og måle nøyaktig et antall avbildede punkter i flere bilder. De målte punktene fungerer som observasjoner for transformasjonen mellom bilde- og terrengkoordinater. Man skiller mellom forbindelsespunkter og kjentpunkter. Den førstnevnte kategorien er punkter som ligger i fellesområdene

mellom bildene, og benyttes i såkalt relativ orientering for å knytte bildene sammen og eliminere y-parallakser. Kjente punkter har på forhånd blitt målt i terrenget, har kjente koordinater, og knytter bildekoordinatsystemet til terrengkoordinatsystemet. Ofte innebærer AT en arbeidsdeling mellom en menneskelig operatør og automatiske systemer, der den menneskelige evnen til å gjenkjenne objekter kombineres med datamaskinens evne til å hurtig matche mange punkter mot hverandre. Til sist i orienteringsarbeidet bestemmes ytre orienterings element og koordinater for ukjente målte punkter for et helt sett bilder ved at de individuelle målingene utjevnes matematisk, såkalt blokkutjevning. Nøyaktigheten til bildeorienteringen er avgjørende for nøyaktigheten som kan oppnås i bildematching.

Etter at bildeorientering er utført, er forutsetningene lagt for epipolar transformasjon og bildematching, som omtales i neste seksjon.

2.3 Bildematching

2.3.1 Problem, prosess, sentrale begreper

I henhold til Schenk (1999, s. 243), kan problemet i bildematching gjengis slik: ”

1. Select a matching entity in one image,
2. Find its conjugate (corresponding) entity in the other image;
3. Compute the 3-D location of the matched entity in object space.
4. Assess the quality of the match.”

Hvis man går videre til Scharstein & Szeliski (2001, s. 3), er stegene i stereomatching beskrevet på følgende måte: ”

1. matching cost computation;
2. cost (support) aggregation;
3. disparity computation / optimization; and
4. disparity refinement.”

Det er viktig å nevne at de enkelte matcheteknikker ikke alltid uten videre vil kunne passes inn i disse generelle skjemaene, noe ulikheten mellom dem også indikerer. Sitatene viser også at begrepsbruken kan være nokså divers innenfor dette kunnskapsområdet. Det første sitatet er fra en lærebok i fotogrammetri, mens det andre skriver seg fra en artikkel som omhandler algoritmeutvikling og snarere tilhører IT-fagfeltet. Fordi termene er litt ulike, og fordi litteraturen om dette emnet på norsk er ganske sparsom, er det hensiktsmessig å oppklare endel sentrale begreper.

Først kan det imidlertid nevnes at selv om matching her omtales hovedsakelig som en teknikk som benyttes til generering av høydemodeller, er matching, som antydnet i forrige seksjon, anvendelig i en rekke andre områder innen fotogrammetri. Spesielt nyttig er matching for orientering av bilder, der automatisert gjenfinning av rammemerker i scannede analoge fotografier, samt gjenfinning og overføring av fellespunkter og kjentpunkter, kan utføres langt hurtigere (om enn med lavere nøyaktighet punkt for punkt) ved hjelp av matching enn hva en menneskelig operatør kan håpe på å oppnå.

Begrepene stereomatching og bildematching skal forstås som synonymer. Matching av bilder er en stereoteknikk der de samme punktene i to overlappende bilder ettersøkes, før det utføres parallaxsemålinger. Et begrep som kan nevnes i denne sammenhengen er multippel stereomatching (*multiple stereo matching*). Multippel stereomatching kan betraktes som et produkt av økt datakraft, programvareutvikling og ikke minst digitale sensors muliggjøring av å operere med meget høy bildeoverlapp. Bildematching er riktig nok fremdeles basert på matching i stereomodeller, dvs. to bilder som overlapper, men høyere overlapp gjør det mulig å danne flere stereomodeller som dekker noenlunde samme område. At flere bilder avbilder samme punkt kan utnyttes for å øke antall overskytende målinger og derved styrke sikkerheten i matchingen.

Det som blir matchet, kaller Schenk (1999) ”matching entity”, som kan oversettes med matcheentitet eller matcheprimitiv; eksempler kan være gråtoner eller ekstraherte objekter (*features*). Videre kan ”conjugate entity” oversettes med homologe entiteter; denne termen viser til korresponderende entiteter i bilder, dvs. avbildninger av samme objekt, dvs. det som blir ettersøkt i matchingen. ”Homologe punkter” er en betegnelse som har blitt benyttet på norsk (Barstad 1998); ”homologe entiteter” er en noe bredere betegnelse som innbefatter f.eks. linjer og arealer i tillegg til punkter.

Et annet fenomen som har ulike betegnelser er *hvordan* man måler hvor godt matcheentiteter korresponderer med hverandre.² Schenk (1999) bruker begrepet ”similarity measure”, mens ”matching cost” benyttes av Scharstein & Szeliski (2001) og andre. Den siste termen viser til at metodene som benyttes gjerne er matematiske kostfunksjoner, der hensikten er å minimere en eller annen form for kostnad (I mange tilfeller er det strengt tatt ikke likheten mellom piksler som måles, men ulikheten, slik at store forskjeller gir høy kostnad). ”Likhetsmål” er en term som eksisterer i norsk språkbruk, og er kanskje mer umiddelbart forståelig enn ”matchekostnad”,

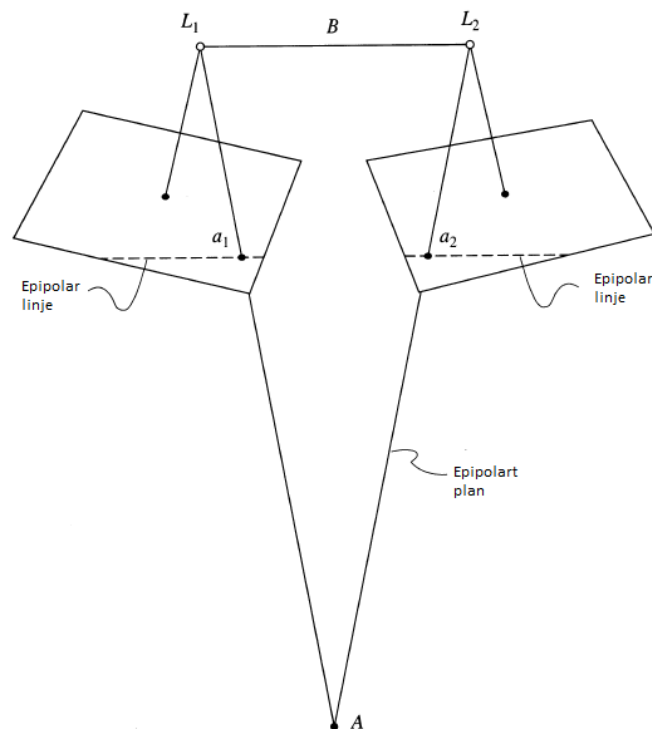
²Et enkelt eksempel kan være differansen mellom gråtoneverdier for to piksler fra to ulike fotografier, der maksimal korrespondanse (likhet) er differanse lik 0.

men her vil den sistnevnte termen benyttes en del for at språkbruken skal ligge så tett opptil litteraturen som benyttes som mulig.

Når det gjelder punktet "cost (support) aggregation" i listen til Scharstein og Szeliski, refererer dette til de stegene som må gjøres for sørge for at en match er "sikker". Dersom to piksler i to ulike fotografier har identisk gråtoneverdi, betyr ikke dette at det ikke finnes andre piksler som gir like gode matcher. En velkjent måte å "aggregere støtte" på, er ved å sammenlikne gråtoneverdier til piksler i nærheten av pikselet man ønsker å matche, da dette gir en mindre flertydig match. Eksempler vil følge i gjennomgangen av de enkelte algoritmene.

2.3.2 Parallaksemålinger og epipolar geometri

Som nevnt i seksjon 2.2.2 er det målinger av parallakser – dvs. parallakser mellom homologe entiteter – som ligger til grunn for etablering av høydedata i fotogrammetri. Et begrep som benyttes av Scharstein & Szeliski (2001) og hyppig ellers i engelskspråklig faglitteratur er *disparity*. Direkte oversatt til norsk betyr dette "ulikhet" eller "forskjell" – og ulikheten det er snakk om er plasseringen av en piksel i et bilde relativt til plasseringen av tilsvarende (homologe) piksel i et annet bilde. "Disparity" er altså sammenfallende med det som har blitt kalt parallakse tidligere i denne oppgaven.



Figur 6: Epipolart plan og epipolare linjer. Lett modifisert fra Mikhail et al. (2001).

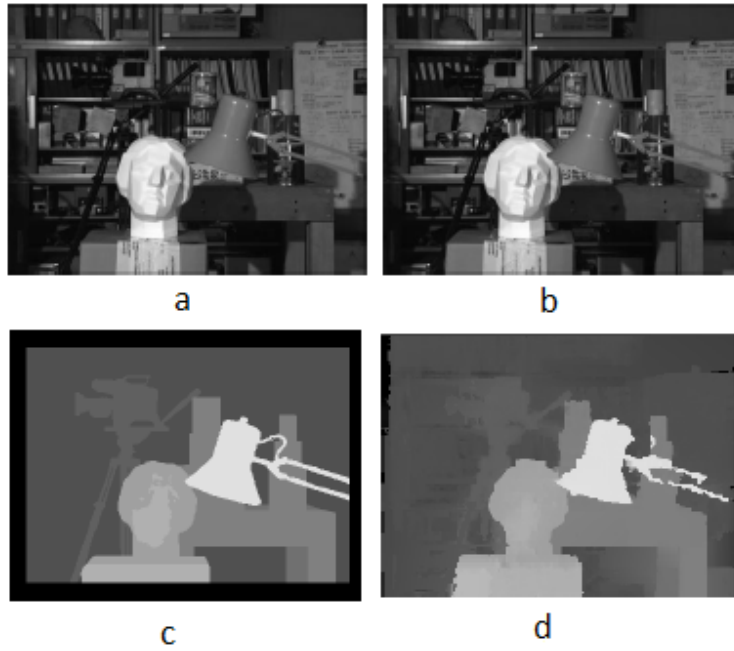
Ofte vil resampling av de bildene som skal inngå i matchingen til epipolar geometri være et innledende skritt i matcheprosessen. Dette krever at bildene har gjennomgått relativ orientering, og innebærer rotasjon og skalering av bildene, samt korreksjon for andre typer deformasjoner som kan forekomme i fotografier. Dersom det ikke forekommer feil i bildeorienteringen vil epipolar resampling resultere i at homologe punkter befinner seg på samme epipolare linje, dvs. samme pikselrad. Dette fører til at søkeprosessen i matchingen begrenses til søk i én dimensjon, noe som øker matchingens hastighet og treffsikkerhet. Prinsippet er illustrert i figur 6: Avstanden $\overline{L_1 L_2}$ er lik basis B . L_1 , L_2 og det avbildede punktet A definerer et epipolart plan, og linjene der planet skjærer de to fotografiene er korresponderende epipolare linjer som inneholder bildepunktene a_1 og a_2 .

For bilder som har gjennomgått transformasjon til epipolar geometri – såkalte epipolare bilder eller normaliserte bilder (*normalized images*) – vil den målte ulikheten (*disparity*) tilsvare x-parallaksen. Resultatet av matchingen kan arte seg som figur 7d, der to testbilder (7a og b) har blitt matchet mot hverandre. Lyse områder angir stor x-parallakse (områder som oppfattes å befinne seg nært kameraet), mens mørke områder angir liten x-parallakse. Tilsvarende vil man kunne beregne dybdeforskjeller – dvs. høydeforskjeller – i flybilder. Når flybildenes ytre orientering er kjent, vil man videre være i stand til å beregne faktiske terrenghøyder. I det følgende vil ulike bildematchingsteknikker bli gjennomgått mer detaljert.

2.3.3 Arealbasert matching

De antakelig best kjente matcheteknikkene er lokale/vindubaserte: Gråtoneverdier til et antall piksler i et bilde – kalt referansevindue – sammenliknes med gråtoneverdier i flere tilsvarende utsnitt av det andre bildet (søkevindue). Vinduene som likner hverandre mest registreres som en match, dvs. anses for å avbilde homologe entiteter. Deretter måles parallaksestørrelsen. I det følgende vil to varianter av arealbasert matching beskrives nærmere.

Korrelasjonsmatching Enkelte teknikker slår sammen de to første av stegene beskrevet i den andre listen som innleder seksjon 2.3.1: matchekostnadsberegning og aggregering av støtte. Et eksempel er korrelasjonsmatching, et av de mest benyttede likhetsmålene ved arealbasert matching. I følge Kraus (2007) beregnes korrelasjonskoeffisient r fra standardavvikene σ_r og σ_s til gråtoneverdiene i referansevinduet g_r og søkevinduet g_s i tillegg til kovariansen $\sigma_{r,s}$ mellom gråtonene



Figur 7: (a og b) To testbilder med overlapp, (c) faktiske x-parallakser; lyse områder – f.eks. lampen i forgrunnen – har stor x-parallakse, (d) resultat av stereomatching med Semi-Global Matching (omtalt under). Modifisert fra Scharstein & Szeliski (2001) og Hirschmüller (2006)

i de to bildene:

$$r = \frac{\sigma_{rs}}{\sigma_r \sigma_s} = \frac{\sum (g_r - \bar{g}_r)(g_s - \bar{g}_s)}{\sqrt{\sum (g_r - \bar{g}_r)^2 \sum (g_s - \bar{g}_s)^2}} \quad (8)$$

der

\bar{g}_r og \bar{g}_s er gjennomsnittlig gråtoneverdi innen referanse- og søkevinduet, som subtraheres fra hver enkelt gråtoneverdi i de to vinduene.

Ved å dividere σ_{rs} på $\sigma_r \sigma_s$ kompenserer korrelasjonsmatching for lysstyrke- og kontrastforskjeller mellom bildene som matches.

Verdiene til denne normaliserte korrelasjonskoeffisienten vil være mellom -1 og 1, der vinduer med liknende gråtonemønstre vil ha koeffisienter nær 1. Korrelasjonsmatching fungerer tilfredsstillende for flate områder, men dersom overflaten er skrå, vil ikke referanse- og søkevinduene dekke like store arealer, noe som kan føre til manglende eller direkte feilaktig matching.

Minste kvadrats matching: En annen mye benyttet teknikk er såkalt minste kvadrats-matching (MKM). MKM kan betraktes som en raffinering, dvs. en subpiksel-justering, av korrelasjonsmatching. Tanken bak MKM er å minimere gråtoneforskjeller mellom referanse- og søkevinduet vha. justering av søkevinduets

posisjon og form. Man kan ta utgangspunkt i et opprinnelig søkevindu $m(i, j)$, funnet f.eks. ved korrelasjonsmatching mot et referansevinduet $r(i, j)$. Det nye søkevinduet $m(x, y)$ finnes gjennom en affin transformasjon

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ d & e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ f \end{bmatrix} \quad (9)$$

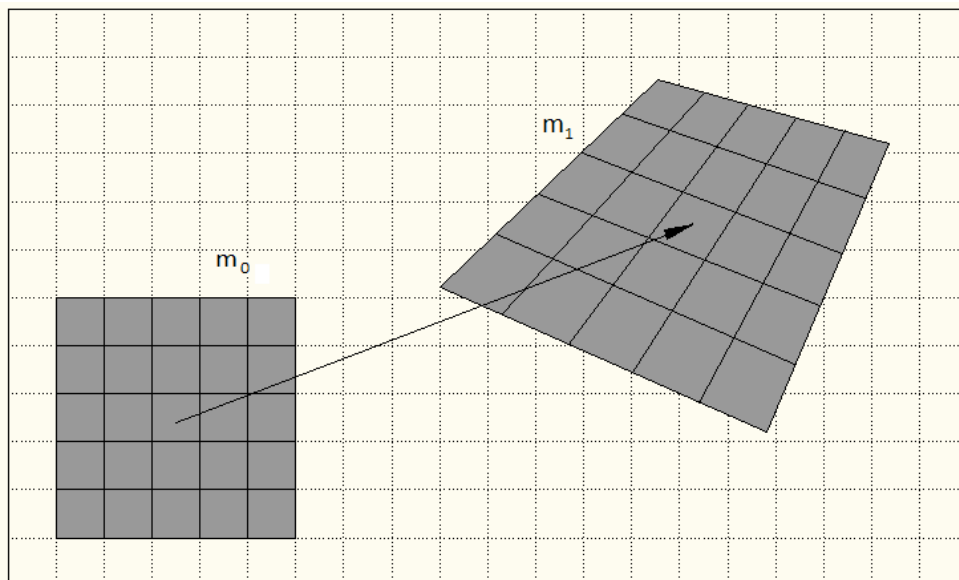
der de seks parametrene a, b, d og e bestemmer rotasjoner, skalaforskjeller og ”shear”, mens c og f angir translasjoner.

Funksjonen $m(x, y)$ må lineariseres. Den lineariserte funksjonen, likning 10.22 i Schenk (1999), skal ikke gjengis her, men det kan nevnes at de partiellderiverte som bestemmer funksjonen utgjøres bl.a. av differansene mellom gråtoneverdiene i $m(i, j)$ og $r(i, j)$. I tillegg inngår gradientverdier, dvs. endringsraten for gråtoneverdiene i en pikselsekvens i x- og y-retning. Dessuten inngår inkremerter til de seks ukjente parametrene; MKM er en ikke-linær tilpasning der løsningen finnes via iterasjon. Ved første iterasjon er observasjonene gråtoneverdiene i det opprinnelige søkevinduet $m(i, j)$. Man får et første estimat av $m(x, y)$. Søkevinduets posisjon og form oppdateres og man får et nytt estimat av $m(x, y)$, etc. Etter at søkevinduet er transformert, vil dets form normalt ikke korrespondere med bildets pikselrutenett, hvilket gjør at gråtonene innenfor søkevinduet må interpoleres, f.eks. ved bilineær interpolasjon. Dette er illustrert i figur 8.

I likhet med korrelasjonsmatching finnes varianter av MKM der det er implementert løsninger som tar høyde for ulik lysstyrke og kontrast i bildene som matches. MKM har potensielt høyere subpiksel-presisjon enn korrelasjonsmatching, helt ned mot 0.01-0.02 piksler. En svakhet ved metoden er at den krever relativt gode initielle verdier (1-2 piksler) for plasseringen til entiteten som ettersøkes for at matchingen skal fungere tilfredsstillende (McGlone, Mikhail, Bethel & Mullen 2005). Transformasjonene av søkevinduene gjør teknikken også mer ressurskrevende enn korrelasjonsmatching. MKM har i praksis også vist seg å ha problemer med korrekt modellering av brå høydesprang (såkalte diskontinuiteter): I stedet for klart definerte vertikale sprang forekommer gradvise overganger i høydemodellen (Jacobsen & Alobeid 2010).

2.3.4 Objektbasert matching

En annen klassisk matcheteknikk kalles feature-based matching (FBM) på engelsk, og har blitt kalt objektbasert matching på norsk (Barstad 1998). Teknikken har blitt ansett som komplementær til arealbasert matching fordi den fungerer bedre ved brå overganger i høyde og i mindre grad er sensitiv overfor radiometriske



Figur 8: Det originale søkevinduet m_0 transformeres til ny posisjon og form etter hver iterasjon. Gråtonene til det transformerte vinduet m_1 må finnes ved interpolasjon. Både forflytningen og størrelsesendringen er overdrevet. MKM er hovedsakelig en raffinering av matchingen på subpikselnivå, og et sprang over til et helt nytt sett piksler fra en iterasjon til den neste gir lite mening. Modifisert fra Schenk (1999).

forskjeller mellom bilder. Objektbasert matching baserer seg på å ekstrahere strukturer/objekter (*features*) i bildene, for så å matche disse mot hverandre.

Til ekstrakksjon av punkter benyttes en interesseoperator – som det finnes mange ulike varianter av – hvis formål er å finne distinkte punkter (eller pikselgrupper) som kan benyttes i matchingen. Et eksempel på en interesseoperator er den såkalte Förstner-operatoren, beskrevet bl.a. i Förstner & Gülch (1987). I denne algoritmen søkes det etter små bildeutsnitt (vinduer) i bildene som er velegnet for matching. Objekter som ettersøkes er kantelementer, møtepunkter mellom linjer, hjørner og sirkelsentre. Disse objekttypene kan beskrives matematisk gjennom normallikninger, der observasjonene er gråtoneverdier innenfor de nevnte små bildeutsnittene. Ved hjelp av f.eks. gradientmålinger innenfor pikselvinduene er det mulig å plassere punktet som skal matches med subpiksel-nøyaktighet.

Det finnes også en rekke kantoperatorer (*edge operators*), som først finner kantpiksler (via f.eks. bildegradienter) og siden grupperer disse pikslene til sammenhengende linjer (Schenk 1999). Ekstraherte punkter og kanter fra et fotografi er illustrert i figur 9.

Steg nummer to i objektbasert matching er å sammenlikne ekstraherte objekter fra ulike bilder. Teknikkene som benyttes i matchingen kan være nokså like dem som ble nevnt i seksjon 2.3.3. I McGlone et al. (2005) nevnes følgende eksempel: Etter at et antall punkter er ekstrahert fra to bilder med en interesseoperator, måles



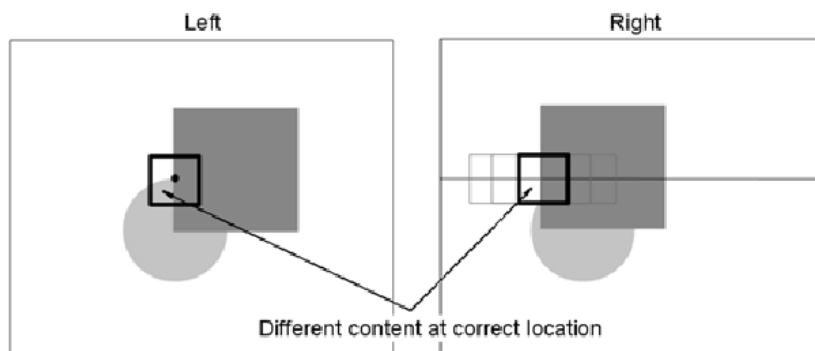
Figur 9: Venstre: fotografi av en del av Schloß Wartburg. Midten: Förstner-punkter. Høyre: Kantlinjer ekstrahert med en såkalt Canny-operator. Hentet fra McGlone et al. (2005).

gråtonekorrelasjonen mellom et antall piksler omkring de ekstraherte punktene. Dette resulterer i en liste over punkter som kan være homologe. Videre estimeres parametre for transformasjonen mellom utsnitt av de to bildene via en robust minste-kvadraters tilpasning. Likningen har høy grad av redundans ettersom hvert bildeutsnitt typisk inneholder 20 til 40 punktpar. Fordi denne teknikken benytter seg mindre av gråtoneverdier enn arealbasert matching, er den ikke fullt så sensitiv overfor ulike lysforhold i bildene. Sammenliknet med den arealbaserte MKM-teknikken beskrevet over, er den dessuten mindre avhengig av nøyaktige initielle verdier for å fungere. Subpikselpresisjonen er dog noe lavere (McGlone et al. 2005).

2.3.5 Matching av enkeltpiksler

Som antydte tidligere kan skrånende flater og brå høydesprang skape problemer for bildematching. Dødvinkel/okklusjoner har vist seg særlig problematisk i vindubasert matching, noe som er illustrert i figur 10. En mulig løsning på disse problemene er å matche enkeltpiksler mot hverandre, samtidig som det innføres betingelser som tar høyde for at ikke alle piksler *kan* matches mot hverandre. Som nevnt tidligere, har ikke enkeltpiksler nok informasjon til at de kan matches unikt, noe som også gjør det nødvendig å innføre tilleggsbetingelser. Såkalte globale matcheteknikker forsøker å finne et *sett* med x-parallakseverdier som minimerer en global energifunksjon (eller ”disparity function”, derav *d*-en i likningen under), som i følge Scharstein & Szeliski (2001) gjerne består av to elementer:

$$E(d) = E_{data}(d) + \lambda E_{smooth}(d). \quad (10)$$



Figur 10: Illustrasjon av problemområde for vindu- og korrelasjonsbasert matching. Søkevinduet på høyre side er plassert på korrekt sted, men gråtonemønsteret fra referansevinduet kan ikke gjenfinnes. Figur hentet fra Hirschmüller (2011).

Første del, $E_{data}(d)$, summerer matchekostnadene, piksel for piksel, mellom to bilder. Annen del, $E_{smooth}(d)$, holder rede på hvorvidt overflaten er glatt (eller kontinuerlig) – f.eks. ved at nabopikslers x-parallakser sammenliknes, eller ved at det tas vare på informasjon om piksler som (pga. dødsvinkel) ikke befinner seg i det ene eller det andre bildet. På denne måten er det mulig å avdekke brå endringer i høyde, som siden kan gjengis i høydemodellen. Annen del av funksjonen etablerer også en indirekte forbindelse mellom alle piksler, slik at funksjonen blir global (Hirschmüller 2011). Utfordringen for denne typen matcheteknikker består kort sagt i å mest mulig effektivt og med høyest mulig presisjon å estimere hvilken av de mange mulige kombinasjonene av parallakser for alle piksler som minimerer $E(d)$; man har å gjøre med det som innen matematikk og IT kalles et optimaliseringsproblem. Det finnes teknikker, som bl.a. Graph Cuts og Belief Propagation, som forsøker å gi en tilnærming til $E(d)$ i to dimensjoner (dvs. de to dimensjonene i bildene som matches), men som i følge Hirschmüller (2011) sliter både med høyt minneforbruk og lang beregningstid. Teknikkene som presenteres i det følgende forsøker derimot å løse parallakseberegningene langs endimensjonale ”pikselstier”.

Dynamisk programmering Et eksempel på piksel-for-piksel-matching er en variant av såkalt dynamisk programmering (*Dynamic programming*, DP). DP er en teknikk innen IT for løsning av problemer ved å splitte disse opp i enklere underproblemer. Metoden som er lagt frem av Birchfield & Tomasi (1999) er avhengig av at de involverte bildene er transformert til epipolar geometri. Gråtonene til et piksel i en epipolar linje i et bilde matches med alle piksler (innenfor en viss søkeradius) i den korresponderende epipolare linjen i et annet bilde. Strengt tatt er det ikke pikslens gråtoneverdier som matches direkte, men en interpolert funksjon som også innbefatter nabopikslers gråtoneverdier – dette blir gjort for å løse et problem med potensielle gråtoneforskjeller mellom enkeltpiksler som følge av

den (tross alt) begrensede sampleringen i fotograferingen. Matchingen resulterer i en todimensjonal ulikhetsmatrise (*dissimilarity matrix*) som inneholder alle kombinasjoner av gråtoneulikheter mellom pikslene i de to bildene. Prinsippet er illustrert i figur 11.

	50	50	55	60	54	50	gråtoner venstre bilderad
	↓						
	45	50	55	49	44	50	gråtoner høyre bilderad
venstre linje ↓					høyre linje →		
	5	5	10	15	9	0	
	0	0	5	10	4	0	
	5	5	0	5	1	5	ulikhetsmatrise
	1	1	6	11	5	1	
	6	6	11	16	10	6	
	0	0	5	6	6	0	

Figur 11: Ulikhetsmatrise beregnet fra bilderader i to bilder. Verdiene i matrisen er absolutte forskjeller mellom alle piksler i de to bilderadene. Første kolonne i ulikhetsmatrisen gjengir forskjeller mellom første piksel i venstre bilderad og alle piksler i høyre bilderad, osv. Figuren er bare ment å illustrere prinsippet til en ulikhetsmatrise; i Birchfield & Tomasi (1999) involveres også verdiene i nabopiksler når elementene i ulikhetsmatrisen beregnes. Figur modifisert fra Jacobsen & Alobeid (2010).

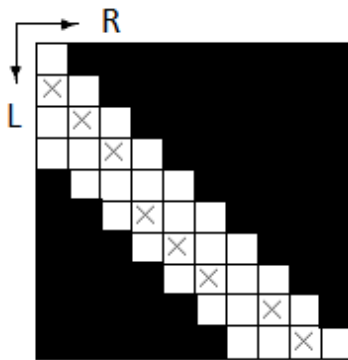
Samlet baserer teknikken seg på følgende kostfunksjon (Birchfield & Tomasi 1999):

$$\lambda(x, y) = \sum_{i=1}^{N_m} d(x_i, y_i) - N_m \kappa_m + N_{okk} \kappa_{okk}, \quad (11)$$

der første komponent er summen av ulikhetene (x_i, y_i) mellom de matchede pikslene, noe som bør være den tyngst vektete delen av funksjonen. Dette tilsvarer $E_{data}(d)$ i likning 10. Annen komponent $N_m \kappa_m$ er en ”belønning” (*reward*), hvor N_m er antall matchede piksler og κ_r er en fastlagt belønning for hver matchede piksel, dvs. piksler der ulikheten i gråtoneverdi er mindre enn en gitt terskel. Tredje komponent $N_{okk} \kappa_{okk}$ er et tillegg (*penalty*) for okklusjoner – dvs. der algoritmen ikke er i stand til å søke seg fram til piksler som matcher hverandre tilstrekkelig godt – der N_{okk} er antall okklusjoner og κ_{okk} er størrelsen på tillegget.

Ut fra formel 11 og noen tilleggsbetingelser (bl.a. behandling av områder med dårlig tekstur) genereres en kostmatrise, der det diagonalt beregnes en optimal sti (*optimal path*) hvor summen av kostnadene er lavest. Dette er eksemplifisert i figur 12 (dog uten konkrete tallverdier i kostmatrisen). Den optimale stien bestemmer den geometriske relasjonen mellom venstre og høyre epipolare linje, dvs. hvilke piksler som korresponderer med hverandre. Hvordan den optimale stien bestemmes, er et

optimaliseringsproblem med flere potensielle løsninger. Uten å gå for mye i detalj, kan det nevnes at det kan benyttes en fremadskuende (*forward-looking*) algoritme som, når den kommer til en ny celle, undersøker alle etterfølgende matcher for å se hvilken av disse som passer best med cellen som undersøkes. Birchfield & Tomasi (1999) utviklet teknikker for å ekskludere enkelte stier gjennom kostmatrisen, for slik å oppnå høyere hastighet i matchingen.



Figur 12: (a) Matchesekvens gjennom kostmatrise i DP. R og L tilsvarer rader i høyre og venstre bilde. Hvite felter angir søkeradien (dvs. største antatte/tillatte x-parallakse) som er benyttet. "x" markerer en match. Rader eller kolonner uten "x" tilsier okklusjon. Figur hentet fra Birchfield & Tomasi (1999).

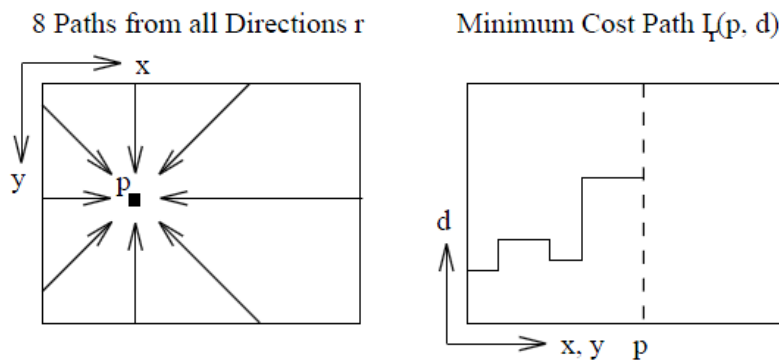
Et problem ved matching av enkelte epipolare linjer, er at den manglende forbindelsen mellom hver pikselrad kan føre til stripeeffekter i høydemodellene som genereres. Dette kan delvis bøtes på ved bruk av etterprosesseringsfiltre, f.eks. et filter som utjevner gråtoneforskjeller mellom pikselrader.

Semi-Global Matching (SGM), første gang presentert i Hirschmüller (2005) er en videreutvikling av DP som, basert på pikselsti-konseptet, matcher enkeltpikslers mot hverandre. Hensikten for SGM er å minimere en global energifunksjon $E(D)$:

$$E(D) = \sum_p \left(C(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1] \right) \quad (12)$$

Første del summerer piksel for piksel-matchekostnadene $C(p, D_p)$ for et globalt sett (dvs. beregnet for alle pikslers p) med parallakser (*disparities*) lik D_p . Annen del er et tillegg P_1 for alle pikslers q i nærheten N_p av p der det forekommer små endringer i parallakse mellom to suksessive pikslers i en pikselsti. Tredje del er et tillegg P_2 for større endringer i parallakse, dvs. et tiltak for å avdekke brå høydesprang. P_2 slår typisk inn ved store gråtoneforskjeller mellom nabopikslers. Funksjonen $T[\cdot]$ returnerer 1 eller 0, avhengig av om argumentet er sant eller ikke (Hirschmüller 2008).

Flere ulike matchekostnadsteknikker har vært utprøvd for SGM. I de første publikasjonene om SGM ble Mutual Information (MI) fremhevet. MI ble i utgangspunktet utviklet for å sammenlikne bilder fra ulike sensortyper og fungerer godt ved betydelige gråtoneforskjeller mellom bildene (som f.eks. kan forekomme pga. ulike lysforhold under fotografering). Kort fortalt baserer MI seg på entropi, som kan benyttes som et mål på likheten mellom bildene. En annen teknikk som har vært utprøvd (Hirschmüller & Bucher 2010) og som har vist seg velegnet i møte med radiometriske forskjeller, kalles Census. Denne teknikken omformer et nabolag av piksler (typisk 9×7 piksler) til en bitvektor der alle piksler med høyere gråtoneverdi enn senterpikset får verdien 1 (og alt annet får verdien 0). Deretter sammenliknes to piksler ved at Hamming-distansen, dvs. antall bits som ikke er identiske, beregnes mellom bitvektorene. Dette er riktig nok ikke tilstrekkelig for unik matching, men som vist i likning 12, kombineres utregningen av matchekostnadene med andre betingelser.



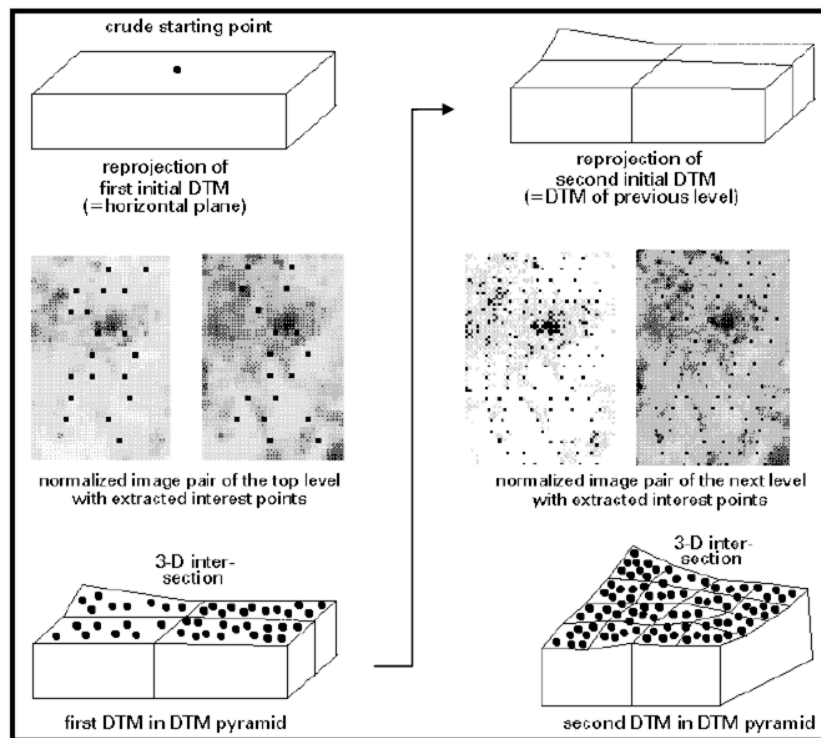
Figur 13: Prinsipp for aggregering av kostnader i SGM: Venstre side: Pikselstier fra ulike retninger, sett i et bildekoordinatsystem. Høyre side: En enkelt optimal pikselsti, der bildekoordinater (x,y) er angitt langs en akse og parallaksen (d) er angitt langs den andre aksen. Det fremgår at parallaksen for pikslene som utgjør den optimale stien fram mot piksel p er varierende. Figur hentet fra Hirschmüller (2008).

Problemet, slik det er definert i SGM, består altså i å finne det globale settet med x -parallakser som minimiserer likning 12. Til forskjell fra DP aggregeres ikke kostnadene langs epipolare linjer, men langs 1-dimensjonale stier fra mange ulike retninger (f.eks. 16 eller 8 retninger) i bildene. Dette gjør SGM noe mer ressurskrevende enn DP. Prinsippet er illustrert i figur 13. Den minimale summen av kostnadene langs en sti fra en bestemt retning beregnes ut fra kostnadene for et piksel langs denne stien (målt ved hjelp av f.eks. MI eller Census) og eventuelle tillegg (jf. formel 12), samt den laveste kostnaden for forrige piksel. Når alle stier er "oppgått", summeres kostnadene for alle stier for alle (relevante)

parallaksestørrelser, og den parallaksen som for det aktuelle pikselet gir lavest kostnad blir valgt. En enkelt parallakseverdi for et piksel er altså resultat av konsistenssjekk mot andre piksler i bildene. Etter at parallaksene for alle piksler i bildene er beregnet utføres okklusjonsdeteksjon som en av flere post-prosesser som finpusser resultatet (Hirschmüller 2011).

2.3.6 Hierarkisk matching

DP og SGM er eksempler på matchemetoder som ikke kan sies å være distinkt lokale eller globale. Andre eksempler er algoritmer som anvender såkalte grov-til-fin-teknikker (*coarse-to-fine*) (Scharstein & Szeliski 2001) som foretar matching i versjoner av fotografiene der oppløsningen har blitt redusert (bildepysteramider). Matcheteknikkene som benyttes kan imidlertid være de samme som har blitt nevnt tidligere, f.eks. MKM og objektbasert matching.



Figur 14: Hierarkisk grov-til-fin-teknikk. Fra komprimerte versjoner av bildene ekstraheres et lite antall punkter som benyttes til å danne en grov høydemodell. Denne modellen benyttes som utgangspunkt for den mer detaljerte matchingen. Figur lett modifisert fra ZI Imaging Corp. (2010).

Som nevnt tidligere er initielle estimer for hvor den ettersøkte entiteten befinner seg nødvendig for at bildematching skal fungere tilfredsstillende. Man kan ta for seg følgende eksempel, hentet fra McGlone et al. (2005): Initielle estimer er i stand til å angi korrekt posisjon med en nøyaktighet på f.eks. 6 piksler, men matcheteknikken

krever nøyaktighet på 4 piksler for å fungere. Dersom to og to piksler i originalbildet slås sammen, vil estimatet tilsvare 3 pikslers nøyaktighet i det nye bildet. Matchingen kan gjennomføres, og resultatet er et nytt og mer nøyaktig estimat som kan benyttes i matchingen av det originale fotografiet. For å ta høyde for enda mer upresise initielle estimater, eller for å oppnå større sikkerhet i matchingen, kan det genereres pyramider av bilder med stadig lavere oppløsning.

Hierarkisk matching benytter seg gjerne av interativ oppdeling av utsnitt (*patches*) fra høyere pyramidenivåer. Referansebildet i høyeste pyramidenivå deles opp i små utsnitt med små parallakseforskjeller. Størrelsen på et slikt utsnitt avhenger med andre ord av overflatens karakter (dvs. om den er jevn eller diskontinuerlig) samt av pikselstørrelsen i bildene. Disse utsnittene matches med et tilsvarende utsnitt i søkebildet, og transformasjonsparametrene mellom utsnittene bestemmes. Hvert utsnitt deles så opp i fire mindre utsnitt på neste pyramidenivå, og matcheprosessen repeteres ved hjelp av resultatene fra forrige nivå i pyramiden. Prosessen gjentar seg, og når laveste pyramidenivå er matchet, står man med en detaljert gjengivelse av overflaten (McGlone et al. 2005).

2.4 Tidligere tester av høydemodeller fremstilt ved tett matching av flyfotografier

De siste årenes utvikling innen digital fotogrammetri, og da ikke minst teknikker for tett matching – som f.eks. SGM – har bidratt til en hel del optimisme angående hvorvidt høydedata fremstilt ved bildematching kan konkurrere med laserskanning. Dette gjelder både i akademiske kretser og blant kommersielle aktører. Flere praktiske undersøkelser av tett matching av flyfotografier har blitt utført, og resultatene fra noen av disse er som følger:

Lemaire (2008) fant at versjon 5.1 av MATCH-T DSM fra Inpho, gitt flyfotografier med 7 cm GSD og overlapp på 80/60, ga et gjennomsnittlig høydeavvik på -2.2 cm og standardavvik på 10 cm relativt til et antall kontrollpunkter³.

I en test av BAE Systems programvare for tett matching Next-Generation Automatic Extraction (NGATE) med skannede bilder med 5 cm GSD fant DeVenecia, Walker & Zhang (2008) RMSE på 18 cm ved sjekk mot 204 kontrollpunkter. RMSE falt til 10 cm når de 192 kontrollpunktene med lavest avvik ble benyttet.

Optimismen fra akademisk hold uttrykkes i tittelen på et konferanseinnlegg av Haala (2009): *Comeback of Digital Image Matching*. Dette var en gjennomgang av

³Det henvises til seksjon 3.1.2 for nærmere omtale av nøyaktighetsmålene omtalt i denne seksjonen.

ulike undersøkelser, der man genererte høydemodeller fra fotografier tatt med tre digitale sensorer, DMC, UltraCam-X og Quattro DigiCam. Programvaren som ble benyttet i matchingen var Match-T DSM 5.1. Fra bildesett med GSD lik 8 cm ble det generert høydemodeller med grid-oppløsning på 0.2 m. RMS lå mellom 4.2-8.8 cm relativt til et antall kontrollpunkter på bakken. Etter fjerning av grove feil lå RMS mellom 3.9-5.3 cm. En visuell fremstilling av en høydemodell fra DMC-sensoren ved siden av en høydemodell fra laserskanning viste at en bygning ble bedre gjengitt i sistnevnte. Et sitat fra konklusjonen går som følger:

Compared to [LiDAR], results from image matching are still more error-prone [...] and still provide results of partly varying geometry. Despite these limitations, the current performance of digital image matching enables a number of applications like DSM and DTM generation at sufficient quality.” (Haala 2009, s. 301).

Hirschmüller & Bucher (2010) fremla resultater av tester av SGM benyttet på bilder fra de digitale sensorene UltraCam-X, DMC og Quattro DigiCAM. For høydedata generert med bilder fra de tre sensorene med GSD lik 8 cm fant man RMS relativt til et antall kontrollpunkter på hhv. 5.1, 3.2 og 2.6 cm. Man konkluderte med følgende: ”[H]igh quality DSMs, which are more accurate and have more detail than a laser DSM, can be created from all tested aerial cameras” (Hirschmüller & Bucher 2010, s. 10). Forfatterne vektla imidlertid at meget høy overlap – 80 % langs flyretningen og 70% på tvers – var nødvendig for å gi virkelig gode resultater.

Rothermel & Haala (2011) fremla et konferansepaper der ulike digitale sensorer ble testet, og der GSD var 8 cm. Ved å variere antall bilder som ble matchet mot hverandre, fant man at gjennomsnittlig høydeavvik for en filtrert punktsky – produsert med SGM over en fotballbane med bilder tatt av UltraCam-X – ble redusert fra ca. 15 cm til ca 5 cm når antall matchede bilder ble økt fra 2 til 5. Forfatterne viste også at økt basislengde mellom bildene ga noe bedre presisjon, men også lavere andel vellykkede matcher. Ved matching av bildepar fra UltraCam-X med basis/høyde-forhold lik 0.26 produserte SGM høydedata med noe lavere høydepresisjon enn data Leicas ASL 50-laserskanner – ca. 4.8 cm mot 1.5 cm (etter filtrering).

2.5 Flybåren laserskanning – en kort presentasjon av teknologien, og sammenlikning med fotogrammetri

Siden høydemålinger fra laserskanning fungerer som en referanse i denne besvarelsen, følger her en kort beskrivelse av denne teknologien.

Flybåren laserskanning – også kjent som LiDAR (Light Detection And Ranging) – fungerer ved at lyspulser eller kontinuerlige monokrome lysbølger sendes mot et roterende speil og spres mot bakken. Operasjonshøyde er typisk fra et par hundre m til 5-6 km over overflaten. Pulsbaserte lasere kan sende ut flere hundre tusen pulser pr. sekund. Bølgelengden til laserlyset er omkring 1040-1060 nm. Lyset blir reflektert fra overflaten og returnert til lasersystemets mottaker. Tiden mellom signalutsendelse og -mottak måles. Avstanden R til målet for pulsbaserte laserskannere er i følge Baltsavias (1999) gitt ved:

$$R = \frac{1}{2}c \cdot t_L \quad (13)$$

der c er lyshastighet og t_L er tiden fra utsendelse til mottak av signal.

Til georeferering innen laserscanning benyttes kinematisk GPS og INS montert på den aktuelle platformen; disse dataene må etterposeseres for økt nøyaktighet. Økt høydenøyaktighet sikres også ved kontroll mot, og justering etter, plane kontrollflater med kjent høyde. I tillegg er det vanlig å utjevne høydene i de overlappende delene av nabolaserstriper. Laserskanning har høyere nøyaktighet i høyde enn i plan – Gehrke et al. (2010) anslår hhv. 5 cm og 10-30 cm (avhengig av flyhøyde).

Punkttettheten for laserskanning avhenger av en rekke faktorer, bl.a. laserens egenskaper (f.eks. pulsfrekvens), flyhøyde, flyhastighet og skannevinkel (field of view). Over et areal vil også varierende terreng høyde og dødvinkler gi ulik punkttetthet (Statens kartverk 2011b, TerraTec AS u.å.).

Resultatet av laserskanning er en samling punkter med koordinater i tre dimensjoner – en punktsky. Laserinstrumentet registrerer intensiteten til hver pulsetur, som er knyttet til reflektansen til objektet som er truffet. Man kan ikke på forhånd definere hva slags type objekter som skal måles, men en gunstig egenskap ved teknologien er evnen til å registrere to eller flere retursignaler fra samme puls. Dette muliggjør avstandsmåling til flere objekter, f.eks. tretopper og skogbunn. Laserskanning kan imidlertid ikke å trenge igjennom kompakte strukturer som f.eks. bygninger. I årene etter at laserskanning slo igjennom har det blitt utviklet en rekke algoritmer som f.eks. ut fra statistiske kriterier kan detektere vegetasjonspunkter eller punkter som tilhører den ”bare” terrengoverflaten. Slike algoritmer kan benyttes til å klassifisere punktskyene, og til å produsere DTM’er med utgangspunkt i ”rå” laserpunktskyer.

I en sammenlikning mellom laserskanning og fotogrammetriske teknikker kan følgende nevnes, hovedsakelig etter Kraus (2007).

- Fotogrammetriske teknikker krever at et objekt er synlig i to fotografier, mens

det i laserskanning er tilstrekkelig at bare en del av en laserpuls treffer objektet. Dette gjør laserskanning gunstig i kartlegging av vegetasjon og tettbebygde områder der mye av overflaten er skjult.

- Siden laserskanning er en aktiv sensor, er teknikken mindre væravhengig enn flyfotografering. Gjennomtrenging av skyer er imidlertid også et problem for laserlys.
- Bildematching er sensitiv for homogene overflater, dvs. overflater der pikselverdiene varierer lite og der sjansen for entydig matching følgelig er lav. Laserskanning har ingen tilsvarende problemer med dårlig tekstur, og er følgelig bedre egnet til kartlegging av overflater som sanddyner, snø, matte betongoverflater, samt skyggeområder. Vannoverflater byr på problemer for begge teknikker: Skiftende og ofte dårlig teksturert overflate gir lav matcheprocent, mens høy absorpsjon gir få returnerte lasersignaler. For laserskanning vil speilliknende overflater som reflekterer lasersignalet vekk fra sensoren kunne by på problemer.

I Leberl et al. (2010) hevdes det at bildematching har en rekke fordeler sammenliknet med laserskanning når det gjelder produksjon av digitale høydedata. Noen av påstandene herfra kan nevnes:

- Den geometriske nøyaktigheten ved bruk av AT overgår resultatet av den direkte georefereringen som benyttes for data fra laserskanning.
- Bildematching gir høyere punkttetthet, som videre gir bedre definerte diskontinuiteter.
- Billigere, mer effektiv innsamling av data.
- Informasjonsmengden i fotografier er høyere, og gjør det enklere å tolke data.
- Færre huller i datasettene når man benytter høy bildeoverlapp [Bemerk en viss faglig divergens, jf. det første punktet i den foregående punktlisten].

2.6 Ortofoto og sanne ortofoto

Siden anvendeligheten til høydedata fra tett bildematching for produksjon av såkalte sanne ortofoto vil bli undersøkt i denne oppgaven, følger her kort gjennomgang av temaet ortofoto.

Gjennom såkalt ortorektifisering kan man eliminere effektene av radiell forskyvning og dermed fjerne målestokkvariasjoner i (fly)fotografier. Der normale flyfotografier har sentralprojeksjon og perspektiv, har ortofoto – i likhet med kart – ortogonalprojeksjon. Alle pikslene i et ortofoto dekker samme areal, og pikslene korresponderer derfor direkte med terrengets koordinatsystem. Dermed kan ortofoto benyttes som grunnlag for kartkonstruksjon, som et lag (*layer*) i GIS-systemer, og kan draperes over høydemodeller i 3D-visualiseringer.

Nødvendige inndata for ortorektifisering er et ferdig orientert digitalt fotografi, samt tilgang på en DHM som dekker samme område som fotografiet. Et ortofoto er en ”fullstendig” radiometrisk rekonstruksjon av overflaten, der bildepikselkoordinatene transformeres til terrengkoordinater (jf. formel 7). Man kan betrakte ortoprojeksjonen som relativ krymping eller ekspandering av områder i flyfotografiet som befinner seg hhv. nært eller fjernt fra projeksjonssentrum. Siden det dermed ikke er noe 1:1-forhold mellom pikslene i flyfotoet og ortofotoet, må gråtoneverdiene i ortofotoet interpoleres fra nabopikslar i flyfotografiet.

I følge Andersen & Maalen Johansen (1998) vil feil i et punkt i et ortofoto henge sammen med punktets avstand til nadir, på samme måte som radiell forskyvning:

$$\Delta R_{orto} = \frac{\Delta H_{DHM}}{H} \cdot R, \quad (14)$$

der

ΔR_{orto} er ortofotoets horisontale feil i terrenget og

ΔH_{DHM} er høydefeil i den digitale høydemodellen,

H er flyhøyde og

R er radiell avstand fra terrengnadir.

Hvis R er 0, vil det heller ikke være noen horisontal feil i ortofotoet (dette forutsetter dog feilfri bildeorientering). Retningen på feilen vil være inn mot eller bort fra nadirpunktet, avhengig av om H_{DHM} er positiv eller negativ, dvs. om høydemodellen er for høy eller for lav i forhold til det virkelige terrenget.

For å dekke store områder kan enkeltortofoto settes sammen i såkalte mosaikker. Mosaikking av ortofoto er langt på vei en automatisert prosess, der programvaren typisk benytter billedata fra det ortofotoet som for et gitt punkt har kortest avstand til nadir (for å minske ortofotofeil i henhold til likning 14). Ofte vil slik programvare utjevne fargekontraster mellom nabobilder, slik at mosaikken i størst mulig grad gir inntrykk av å være et sammenhengende bilde.

I konvensjonelle ortofoto benyttes en DTM, der vegetasjon og de fleste bygninger ikke inngår. Det er vanlig i dagens ortofotoproduksjon å modifisere DTM'en, slik at større konstruksjoner som f.eks. broer er inkludert (Statens kartverk 2011a),

men et konvensjonelt ortofoto vil genereres med en høydemodell der det ikke er høyden på toppen av bygningene, men jordoverflaten de befinner seg på som er modellert. Disse bygningene vil ikke rektifiseres korrekt og vil fremdeles lene seg bort fra nadirpunktet. Sanne ortofoto genereres derimot med en DOM, slik at alt som befinner seg i flyfotografiet ideelt sett skal gjengis som om det var avbildet rett ovenfra.

Årsaken til at sanne ortofoto i dag produseres nokså sjeldent (Statens kartverk 2011a) henger sammen med at det har vist seg problematisk å generere høydemodeller som gjengir bygninger med tilstrekkelig nøyaktighet. Dersom høydemodellen ikke gjengir de rette linjene og brå høydesprangene som bygninger gjerne består av, vil dette kunne resultere i tydelige visuelle feil i ortofotoene. I forskningslitteraturen om sanne ortofoto har man forsøkt å benytte ulike teknikker for å løse dette problemet, og noen eksempler kan nevnes: Günay, Arefi & Hahn (2007) kombinerte høydemodeller fra laserscanning med vektordata som gjenga omrisset av bygninger. Amhar, Jansa & Ries (1998) og Zhou, Chen, Kelmelis & Zhang (2005) har utviklet metoder for kombinasjoner av "rå" høydemodeller med mer komplekse, vektorbaserte DBM'er med topologi, ulike objekttyper og ikke minst rette linjer. Wu & Jie (2011) har presentert teknikker for ekstrahering av linjesegmenter fra LiDAR-høydemodeller, der linjesegmentene videre kan benyttes for å øke DOM-presisjonen. Disse løsningene gjør det mulig å modellere rette linjer samt å unngå at bygninger avrundes, men behovet for tilleggsdata, ekstra programvare og operatørmedvirkning gjør fremstillingen av sanne ortofoto mindre automatisert. Imidlertid har det blitt hevdet i et konferanseinnlegg at sanne ortofoto nærmest uten artefakter kan produseres utelukkende ved bruk av digitale flybilder og høydedata fra tett matching. En viktig årsak til at dette er mulig, hevdes det, er at den høye punkttettheten i høydedata fra tett bildematching gir meget skarpt avgrensede bygninger (Wiechert & Gruber 2010).⁴

Et problem som gjenstår selv etter korrekt rektifisering av objektene i et flyfoto, er okklusjoner. Høye objekter som lener seg bort fra nadirpunktet vil medføre at det som befinner seg på bygningenes "bakside" relativt til nadir ikke vil synes i ortofotoet. Rektifisering vil resultere i et ufullstendig ortofoto, siden informasjonen på baksiden av bygningen ikke er tilgjengelig. Dette er illustrert i figur 15. Generering av sanne ortofoto krever derfor programvare som er i stand til å oppdage okklusjoner og fylle dem med informasjon fra fotografier som er tatt fra andre posisjoner.⁵

⁴Den nevnte publikasjonen tilhører et bestemt segment av fotogrammetriske forskningskonferanser som kanskje kan kalles "kommersielle aktørers presentasjon av egne produkter". Slike innlegg bør ikke tas for alvorlig som forskningspublikasjoner, men siden denne publikasjoner omhandler aktualiteter som er høyst relevante for denne oppgaven, er den verdt å nevne.

⁵Okklusjonsdeteksjon og fylling av okklusjoner er et stort forskningsemne i seg selv og vil ikke



Figur 15: Venstre bilde: konvensjonelt ortofoto der bygningene lener seg bort fra nadir og husvegger fremdeles er synlige. Høyre bilde: sant ortofoto, der bygningene er korrekt rektifiserte og okkluderte områder er svarte. Hentet fra Günay et al. (2007).

Hvorvidt all nødvendig informasjon faktisk er tilgjengelig vil avhenge av hvor stor prosentandel bildeoverlapp man har benyttet ved flyfotograferingen; særlig i urbane områder med høye bygninger og trange gater mellom bygningene, vil man være avhengig av høy overlapp for å oppnå full dekning.

bli behandlet i denne oppgaven. Det nevnes utelukkende fordi det er viktig i genereringen av sanne ortofoto.

3 Metodikk, data, programvare, maskinvare

3.1 Om metodikk

I sin mest basale form er det som skal utføres for å løse problemet nevnt i oppgavens innledning følgende:

1. Generere høydedata med Match-T DSM.
2. Undersøke kvaliteten på høydedataene (inkludert generering og undersøkelse av sanne ortofoto).

Omtale av genereringen av høydedata (dvs. punkt 1) krever at Match-T DSM først har blitt presentert nærmere (seksjon 3.5). Av hensyn til oversiktligheten i oppgaven synes det dessuten mest fornuftig å redegjøre for genereringen av de spesifikke høydedataene like i forkant av første gang de blir undersøkt. Derfor blir punkt 1 dekket ved at det oppgis hvilke Match-T-parametre som ble benyttet i høydedatagenereringen tidlig i seksjon 4.1, 4.2 og 4.3.

Når det gjelder punkt 2, dvs. undersøkelse av kvaliteten til digitale høydedata, er oppgavens hensikt å belyse temaene nevnt i oppgavens innledning. Derfor er det hensiktsmessig å gjenta disse temaene sammen med en utdypelse og forklaring av hvordan temaene søkes belyst (seksjon 3.1.1). I tillegg kreves en redegjørelse for spesielle ”problemer” ved kvantitative nøyaktighetskontroller av digitale høydedata, samt hvordan disse vil bli søkt løst (seksjon 3.1.2).

3.1.1 Oppgavens hovedtemaer og undersøkelser

Kvaliteten til digitale høydedata kan undersøkes og dokumenteres på et utall måter. Kvantitative metoder er essensielle for konkretisering av høydedatas kvalitet, men slike data har også karakteristika som taler for benyttelse av kvalitative og mer subjektive metoder. Mange av oppgavens hovedtemaer kan belyses ved bruk av ulike metoder, samtidig som flere av undersøkelsene berører flere av disse temaene. Noen av hovedtemaene kan også overlappe hverandre (f.eks. høydenøyaktighet og det som kalles ”modellering” i denne oppgaven). Derfor vil det ikke alltid være noe 1:1-forhold mellom oppgavens hovedtemaer og undersøkelsene som utføres i denne oppgaven. Det bør også nevnes at seksjon 4.1 skiller seg litt fra de andre undersøkelses- og resultatseksjonene, da det i denne seksjonen benyttes et lite testområde. I de etterfølgende seksjonene undersøkes større, mer omfattende og ”reelle” urbane testområder. I mange tilfeller er det hensiktsmessig at konkrete beskrivelser av fremgangsmåten i undersøkelsene flyttes til seksjon 4, så det følgende må leses som en i hovedsak konseptuell introduksjon til undersøkelsene.

- **punkttetthet og fullstendighet i høydedata fra tett bildematching**

Med fullstendighet skal det her forstås hvor høy punkttettheten er i høydedataene som produseres, samt mengden hull i datadekningen. Hovedseksjonen for undersøkelse av fullstendighet er 4.2. For høydedata fra laserskanning kan punkttetthet, beregnet for mindre utsnitt (f.eks. $10 \cdot 10$ m) av det totale modellområdet, benyttes som et mål på fullstendighet (se f.eks. Statens kartverk (2011b)). Tilsvarende kontroll kan også benyttes i denne sammenhengen, siden produktet som testes er punktskyer, der punkttettheten varierer over testområdene og hull i datadekningen kan forekomme.

- **høydenøyaktighet**

Den antakelig hyppigst benyttede metoden for kontroll av digitale høydedata er målinger av vertikal stedfestingsnøyaktighet, der man måler avvik i høyde mellom en høydemodell og et antall kontrollpunkter. Kontrollpunktene måles ved hjelp av teknikker som har meget høy nøyaktighet, som landmålingsutstyr, f.eks. GNSS. Kontrollpunktene nøyaktighet bør videre være minst tre ganger bedre enn høydemodellen som undersøkes (Maune 2007). Normalt vil det være nødvendig å interpolere høydeverdier for høydemodellen i den horisontale (x, y) posisjonen til hvert enkelt kontrollpunkt. Resultatet av undersøkelser av denne typen angis ofte ved RMSE eller standardavvik, omtalt i seksjon 3.1.2. Absolutt høydenøyaktighet er tema for seksjon 4.3.

- **avvik mellom høydedata fra tett bildematching og høydedata fra laserskanning, samt vurdering av førstnevntes kvalitet sammenliknet med sistnevnte**

Etablering av kontrollpunkter som kan benyttes til absolutt nøyaktighetskontroll er ressurskrevende. En arealmessig mer omfattende kontroll kan gjennomføres ved å sammenlikne en digital høydemodell/punktsky med andre høydedata som beskriver en "sammenhengende" overflate. Resultatet vil angi relativ høydenøyaktighet. Et produkt det vil være nærliggende å sammenlikne høydedata fra bildematching med, er høydedata fra dagens bransjestandard: laserskanning. Ettersom det kan forventes ulike avviksstørrelser for ulike overflater, vil det være hensiktsmessig å gjøre samme undersøkelse på flere ulike overflatetyper. Relativ høydenøyaktighet er tema for seksjon 4.4. I tillegg vil laserdata trekkes inn for både kvantitative og/eller visuelle sammenlikninger i nesten samtlige resultatseksjoner.

- **effekten av bildekonfigurasjoner/bildeoverlapp for kvaliteten på høydedataene**

Seksjon 4.1 er som nevnt litt spesiell, ettersom undersøkelsesområdet er betraktelig mindre og enklere enn i seksjon 4.2-4.8. Det blir forsøkt matchet bilder med ulik relasjon til hverandre (innenfor samme stripe, fra nabostriper, fra striper fra ulike dager). I tillegg matches flere ulike bildeantall. Hensikten er å avdekke hvordan resultatet av bildematchingen varierer ved ulike bildekonfigurasjoner i et område som er mest mulig fritt for ukjente faktorer. Effekten av ulike bildekonfigurasjoner for fullstendighet, vertikal nøyaktighet og modellering av en antatt flat overflate berøres i denne seksjonen.

Når det gjelder undersøkelser av effekten av mer ”realistisk” bildeoverlapp (dvs. et prosenttall langs flyretning og et på tvers), er dette spredt over seksjonene 4.2-4.5. Kvaliteten til flere forskjellige bildesett med ulik bildeoverlapp undersøkes. I tillegg vil forskjellene mellom matching (1) utelukkende mellom bilder i samme flystripe og (2) matching både langs flystripene og mellom flystripene observeres (Dette har liknende effekt som bildeoverlapp, i den forstand at antall bilder som kan benyttes i matchingen av en bestemt entitet er lavere i (1) enn i (2)). Virkningen av bildeoverlapp for fullstendighet, vertikal nøyaktighet og modelleringsevne vil bli omtalt.

- **modellering av ulike overflatetyper i høydedata fra tett bildematching**

Det er vanskelig å gi noen kort, presis definisjon av hva som skal menes med ”modellering” i det følgende. Kort og *upresist* skal det med begrepet modellering forstås hvordan ulike overflater gjengis i digitale høydedata. At digitale høydedata har god modelleringsevne betyr i bunn og grunn at overflatene gjengis (mest mulig) korrekt. I de praktiske undersøkelsene av modellering vil mer konkrete forventninger måtte formuleres.

Modelleringsevne er relatert til kvantitative størrelser, og kan i visse tilfeller kvantifiseres. Modelleringsevnen er knyttet til punktetthet; små detaljer vil normalt gjengis bedre når punktettheten økes. God stedfestingsnøyaktighet er også gunstig for modelleringsevnen, i den forstand at punktene er korrekt plassert (I og for seg er det tilstrekkelig med god presisjon, dvs. at datapunktene er korrekt plassert relativt til hverandre). En kontrollmetode som har blitt benyttet bl.a. i Haala (2009) og Leberl et al. (2010) kvantifiserer støymengden i digitale høydedata over et areal ved å beregne et plan ($z = Ax + By + C$), vha. minste kvadraters metode, fra et sett punkter definert i tre dimensjoner. Deretter beregnes de vertikale avvikene (residualene) til de samme punktene relativt til dette planet. Ved denne metoden ignoreres avvik som stammer fra orienteringen av dataene. Metoden kan også benyttes i to dimensjoner,

dvs. ved at det beregnes avvik fra en minste kvadraters regresjonslinje. I den forstand at de hviler på forutsetningen at en linje eller et plan er en god tilnærming til den faktiske overflaten, er disse metodene naturligvis noe usikre.

For å kunne påpeke spesielle trekk ved modelleringen av ulike overflater, vil det være nødvendig å benytte seg av ulike former for visualiseringer av dataene. Dette gjelder særlig i tilfeller der overflaten er kompleks og det er vanskelig å etablere en fasit som kan brukes til å kvantitativt karakterisere modelleringsevnen.

Seksjon 4.5 omhandler høydedataenes evne til å modellere enkle overflater, dvs. overflater uten store eller brå høydesprang. Forventningen er at slike overflater skal modelleres mest mulig jevnt og støyfritt. Både visualisering og kvantitative mål vil bli benyttet i denne seksjonen, som er ment som en utdypelse av de rent kvantitative seksjonene 4.3 og 4.4. Seksjon 4.6 undersøker modellering av bygninger. Bygninger kan naturligvis bestå av enkle overflater, men like selvsagt kan store deler av bygninger karakteriseres som komplekse og diskontinuerlige overflater. Ønsket er at bygningsmodelleringen består i tydelig gjengivelse av skarpe kanter (f.eks. takmøner), brå høydesprang og små detaljer. I seksjon 4.6 benyttes utelukkende visualiseringer i undersøkelsene. Det samme gjelder seksjon 4.7, som omhandler modellering av trær, og ikke er spesielt detaljert. Årsaken er at det er vanskelig å kontrollere kvaliteten med de midler som her er til rådighet. Laserpunktskyene som kan benyttes som sammenlikningsgrunnlag over andre overflatetyper kan ikke anvendes for områder med trær, både fordi gjengivelsen av vegetasjon er ulik for de to teknologiene, og fordi det kan forventes mye endring fra et datainnsamlingstidspunkt til et annet. Siden trær forekommer i bymiljøer av typen som er undersøkt her, bør temaet likevel berøres.

- **høydedataenes egnethet i automatisert produksjon av sanne ortofoto**

For å belyse dette temaet vil sanne ortofoto generert med høydedata fra tett bildematching bli undersøkt. Ettersom hensikten er å se på automatisert fremstilling av sanne ortofoto benyttes ikke andre inndata enn flyfotografier og ubearbeidede punktskyer fra Match-T DSM. Fokus vil ikke være på kvantitative planimetriske avvik i de sanne ortofotoene, men på ortofotoenes visuelle kvalitet. Eksempler på visuelle problemer som kan oppstå som følge av feil i høydedataene, og som vil bli ettersøkt, er:

- fortegning (dvs. at objekters form ikke blir korrekt gjengitt i ortofotoene),
- ukorrekt plasserte okklusjoner,
- inklusjon av objekter som naturlig finnes i bilder med sentralprojeksjon (f.eks. bygningsvegger) men som ikke skal være til stede i sanne ortofoto.

Dersom det ikke er slik at feilfrie sanne ortofoto kan produseres med høydedata fra tett bildematching, vil neste spørsmål være: Er det forskjell på kvaliteten for ulike typer overflater (f.eks. bygninger, trær, andre overflater)? Og ettersom feil i ortofoto er relatert til et punkts radielle avstand til terrengnadir (jf. formel 14), hvor langt fra nadirpunktet tillater høydedataene sanne ortofoto av akseptabel kvalitet?

Seksjon 4.8 er satt av til denne undersøkelsen.

3.1.2 Spesielle hensyn ved kvantitative nøyaktighetsundersøkelser av digitale høydedata

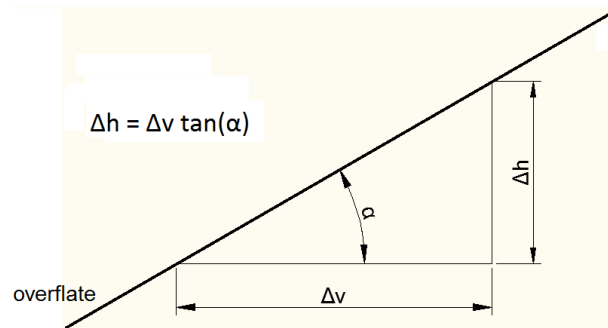
I denne seksjonen påpekes momenter som man må ta høyde for i kvantitative kontroller av digitale høydedata. I tillegg gjøres noen bemerkninger angående statistisk behandling av resultater av slike undersøkelser.

Et problem som gjelder alle typer av kvantitative høydeavviksmålinger, er hvilke punkter/arealer i en høydemodell det er hensiktsmessig å sammenlikne mot andre data. Spørsmålet er knyttet til de ulike typer avvik/feil som anses å forekomme i digitale høydedata: tilfeldige avvik, systematiske avvik og grove feil (eng.: *blunders*) (Maune 2007). Man anser at tilfeldige avvik skyldes årsaker som ikke har noen kjent lov, der avvikenes størrelse og fortegn ikke kan forutsees. Tilfeldige avvik er typisk normalfordelte. Systematiske avvik følger et bestemt mønster og henger gjerne sammen med metodene som er benyttet til datainnsamling og dataprosessering. I teorien er en systematiske avvik forutsigbare og dermed ikke tilfeldige. Når det gjelder grove feil, er dette definert som ”feil som skyldes tabbe, svikt ved måleutstyr eller feil ved prosedyre” i Statens kartverk (2009a, s. 16).

I digitale høydedata er systematiske avvik gjerne knyttet til bestemte overflate-typer: ”It is generally accepted that errors in open terrain, whether from photogrammetry [or] lidar, represent random errors in the sensor systems, whereas errors in vegetated areas may include systematic errors” (Maune 2007, s. 431). Et kontrollpunkt plassert under vegetasjon har liten verdi dersom høydemodellen/punktskyen gjen-gir høyden i toppen av vegetasjonen. I målinger av høydeavvik mellom høydedata fra laserskanning og tilsvarende fra bildematching over terreng med vegetasjon, vil resultatet preges av de to teknikkenes ulike evne til å trenge gjennom vegetasjonen. Vegetasjon vil også typisk gjennomgå store endringer mellom to datainnsamlings-tidspunkter. Slike temporale endringer, som kan forårsake store avvik, er også re-levante for andre typer overflater: Bygninger kan bygges om og anleggsvirksomhet kan heve eller senke overflaten. Trafikk eller mennesker kan være tilstede ved et datainnsamlingstidspunkt og ikke i et annet.

I tillegg kan det argumenteres for at kontroller av vertikal nøyaktighet bør utføres i relativt flate områder. Overflatens helning vil sammen med planimetriske

avvik medføre vertikale avvik som vist i figur 16. Dersom et kontrollpunkt plasseres nær en diskontinuitet, f.eks. nær grensen til et bygningstak, oppstår faren for enda større avvik som ikke gir korrekt inntrykk av høydenøyaktigheten til høydedataene. Det kan innvendes at det er snevert å bare kontrollere vertikal nøyaktighet i områder uten helning og med lang avstand til diskontinuiteter. Dersom man i enhver situasjon hadde kjennskap til planimetriske avvik, ville kontrollene i mer kompliserte områder kunne oppnå større pålitelighet. Fordi detaljert kunnskap om planavvik er tid- og ressurskrevende å etablere, er planimetriske kontroller av digitale høydedata imidlertid relativt sjeldne. Planimetriske avvik er ikke inkorporert i noen av undersøkelsene nevnt i seksjon 2.4 og heller ikke i herværende undersøkelse. Dette krever naturligvis aktsomhet overfor potensielle grove feil som følge av avvik i plan.



Figur 16: Vertikale avvik Δh som funksjon av planimetriske avvik Δv og terrenghelning α . Overflaten er angitt med fet strek.

Selv om man under kontroll av digitale høydedata tar forholdsregler i den hensikt å sikre at avvikene som måles er tilfeldige, forekommer det ofte, som påpekt i Höhle & Höhle (2009), at feil/avvik ikke er normalfordelt og at uteliggere/grove feil forekommer. Derfor advares det mot ukritisk benyttelse av mål for høydenøyaktighet som forutsetter normalfordelte data, som RMSE (Root Mean Square Error – av og til benyttes bare betegnelsen RMS) og standardavvik (σ), dvs.:

$$RMSE_h = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2},$$

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \hat{\mu})^2},$$

der

Δh_i er $h_{data\ i} - h_{sjekk\ i}$, dvs. avviket mellom høydeverdien for det i -te sjekkpunktet i høydedataene og høydeverdien for det i -te sjekkpunktet i kontrolldatasettet og

$\hat{\mu}$ er gjennomsnittlig avvik, $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i$.

I stedet anbefales benyttelse av nøyaktighetsmål som er mer robuste mot ikke-normalfordelte data. Et eksempel på et slikt som nevnes i artikkelen er median, ”a robust estimator for a systematic shift in the DEM” (Höhle & Höhle 2009, s. 400). Et annet eksempel er kvantiler som gjengir absolutte avvik $|\Delta h|$. F.eks. vil absolutt 95%-kvantil angi at den absolutte størrelsen til 95% av avvikene er mindre enn denne.

I Zandbergen (2008) kritiseres benyttelse av konvensjonell 100% RMSE-statistikk av samme årsaker som er nevnt over. Her anbefales det å benytte trimmet RMSE-statistikk som inkluderer de 90% eller 95% av dataene som har minst avvik, for å øke robustheten i behandling av data som ikke er normalfordelte.

Disse observasjonene vil bli tatt hensyn til i undersøkelsene som blir foretatt under. Median, absolutt 95%-statistikk (i tabeller oppgitt som $|95\text{ k}|$) og trimmede RMSE-statistikker bli benyttet som mål på avvik i de undersøkte datasettene. I det ene tilfellet der konfidensintervaller tas i bruk, benyttes såkalt *bootstrapping*, som i følge Höhle & Höhle (2009) er en robust metode ved benyttelse av et lite antall kontrollpunkter.

3.2 Data: flyfotografier

Flyfotografiene som ble benyttet som inndata i denne undersøkelsen stammer fra to ulike datasett, et som dekker Drammen og et som dekker Oslo.

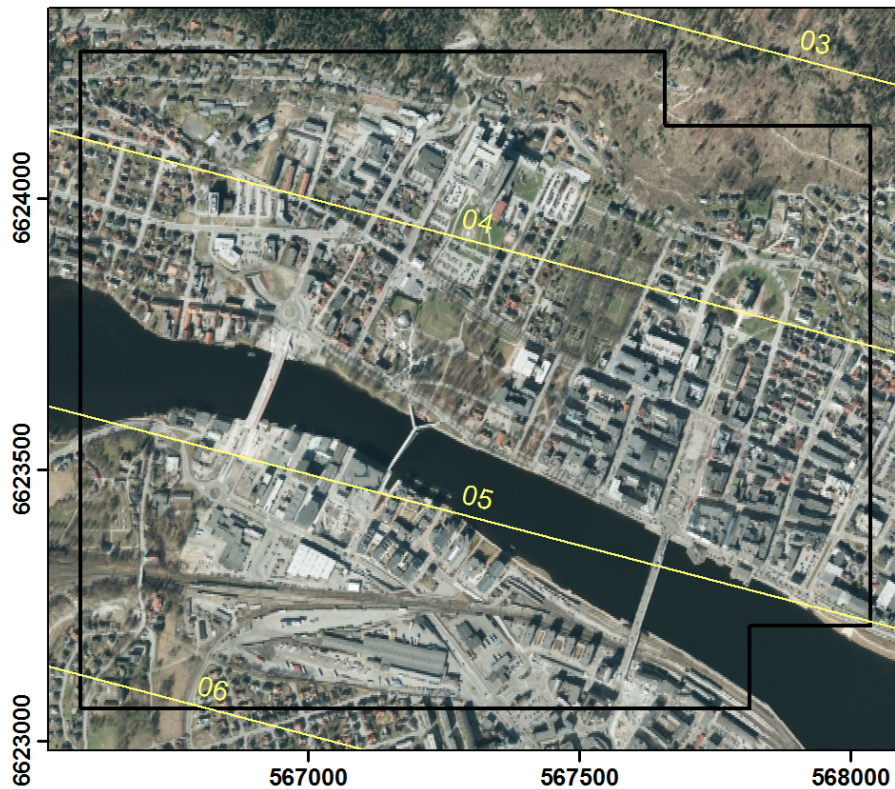
I begge tilfeller ble UltraCam-Xp fra Vexcel Imaging/Microsoft benyttet til fotograferingen. Kameraet, som ble lansert i 2008, har åtte kamerahoder, hvorav fire bidrar til et storformat pankromatisk bilde, og de resterende til et multispektralt bilde med noe grovere oppløsning. Det pankromatiske bildet har et format på 17310 piksler på tvers av flyretningen og 11310 piksler i flyretning. Kameraet har fokallengde på 100 mm, mens størrelsen på hvert pikselelement er 6 μm . Hvis man benytter formel 6, og setter inn flyhøyde på 1150 m (noe som omtrentlig tilsvarer flyhøyden i datasettene beskrevet under), får man dermed GSD på 6.9 cm.

3.2.1 Drammen

Fotografering ble utført av TerraTec AS og fant sted 22.05.2010. Bildeoverlapp var på 60/60. Planlagt GSD var 7 cm (På grunn av variasjon i flyhøyde og overflatens avstand til kameraet ved eksponering vil GSD variere noe i praksis). Det ble utført AT. For å angi nøyaktigheten til bildeorienteringen for dette prosjektet oppgis beregnet RMSE i punkter med kjente koordinater (kjentpunkt): 4.7, 4.2 og 3.2 cm i

hhv. x-, y- og z-dimensjon. Horisontalt koordinatsystem er Euref 89, UTM-sone 32. Høydesystem er NN1954. Bildene som ble benyttet i undersøkelsen er 3 · 8 bit RGB TIF.

Det ble valgt ut et testområde som dekker Drammen sentrum på begge sider av Drammenselva. Testområdet er ca. 1.68 km². 37 bilder fra 5 flystriper dekket deler av dette området. Figur 17 gir en oversikt over testområdet.

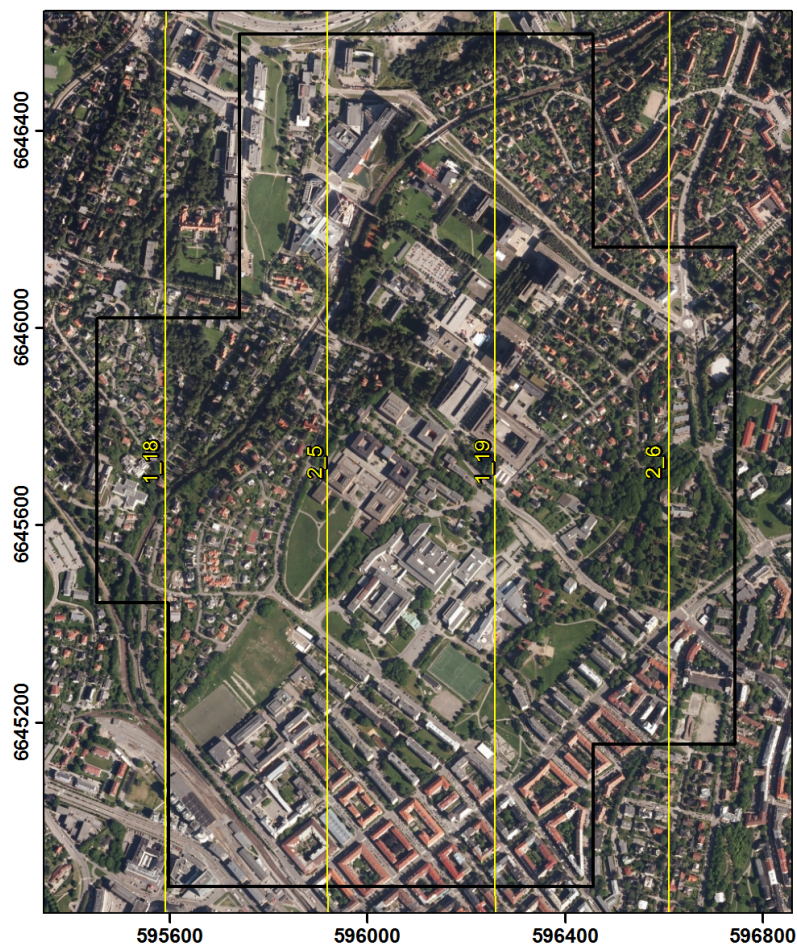


Figur 17: Testområde Drammen sentrum. Svart ramme angir testområdet. Flystriper er tegnet inn i gult, sammen med flystripenr. I tillegg til de avbilde flystripene dekkes også testområdet av noen bilder fra flystripe 7. Ortofoto fra Skog og landskap, Statens vegvesen, Statens kartverk (2013).

3.2.2 Oslo

Fotografering ble utført av TerraTec AS. Prosjektet ble gjennomført i løpet av to flydager, 25.03.2012 og 03.04.2012. Flygningen 25.03 hadde en overlapp på 60/40. Mellom disse stripene ble det flydd og fotografert over Oslo sentrum 03.04 med en overlapp på 80/40. Dette gir tilsammen en dekning på tvers av flyretning på 80 %, mens den varierer mellom 60 % og 80 % i lengderetningen. I de tilfellene der det er nødvendig å referere til enkeltflystriper eller enkeltbilder, vil bildene fra 25.03 betegnes med 1_[flystripenr.]_[bildenr. i flystripe], slik at bilde nr. 17 i flystripe 19 fra 25.03 betegnes som 1_17_19. Ved betegnelse av bilder fra 03.04,

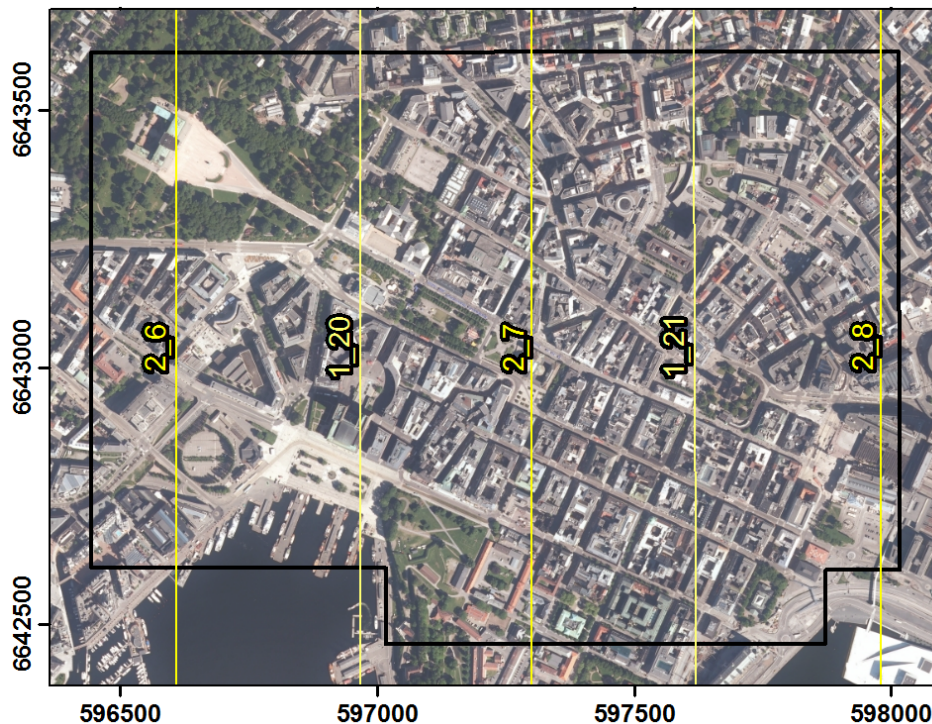
refereres disse som 2_[flystripenr.]_[bildenr. i flystripe]. Ulike fotodatoer gir selvsagt ulike radiometriske forhold, men disse forskjellene ble forsøkt utjevnet så godt som mulig ved hjelp av radiometrisk prosessering. Planlagt GSD var 7 cm, men i praksis var GSD noe lavere. Det ble utført AT. For beregning av nøyaktighet for dette prosjektet ble blokkutjevning utført med 32 kjentpunkt, mens 71 kjentpunkt definert som sjekkpunkt ble holdt utenfor utjevningen. Nye koordinater ble beregnet for sjekkpunktene, og RMS for avvikene mellom disse koordinatene og punktenes korrekte koordinater var 3.2, 3.4 og 4.9 cm i hhv. x-, y- og z-dimensjon. Horisontalt koordinatsystem er Euref 89, UTM-sone 32. Høydesystem er Oslo lokal. Bildene som ble benyttet i undersøkelsen er 3 · 8 bit RGB TIF.



Figur 18: Testområde Blindern-Majorstuen. Svart ramme angir testområdet. Flystriper er tegnet inn i gult, sammen med flystripenr. I tillegg til de avbilde flystripene dekkes også testområdet av noen bilder fra flystripe 1_17, 1_20, 2_4 og 2_7. Ortofoto fra Skog og landskap, Statens vegvesen, Statens kartverk (2013).

Det ble valgt ut to testområder. Det første dekker Blindern, Marienlyst og deler av Majorstuen. Området ble valgt ut hovedsakelig fordi det forenklet oppmåling av kontrollpunkter med GNSS. Testområdet har utstrekning på ca. 1.71 km² og dekkes

av totalt 83 bilder fra til sammen 8 flystriper fra de to flydagene (enkelte bilder dekker testområdet bare såvidt). Figur 18 viser testfeltet.



Figur 19: Testområde Oslo sentrum. Svart ramme angir testområdet. Flystriper er tegnet inn i gult, sammen med flystripenr. I tillegg til de avbildte flystripene dekkes også testområdet av noen bilder fra flystripe 1.19, 1.22 og 2.5. Ortofoto fra Skog og landskap, Statens vegvesen, Statens kartverk (2013).

Det andre testområdet dekker Oslo sentrum. Dette testområdet har en utstrekning på ca. 1.71 km². 68 bilder fra til sammen 8 flystriper fra de to flydagene dekker deler av testområdet. Figur 19 gir en oversikt over dette testområdet, som pga. mange høye bygninger og endel smale gater er betrakelig mer problematisk mtp. dødvinke enn de øvrige testområdene.

3.3 Referansedata: punktskyer fra laserskanning

3.3.1 Drammen

Laserdata som dekker Drammen ble innsamlet og levert av TerraTec AS. Datainn-samling ble foretatt 21.06.2010 med en ALS 50-II laserskanner. Etter innsamling ble data bearbeidet ved justering av feil i GPS- og INS-data, korreksjoner mellom laser-stripene, samt høydeavvikskontroll mot kontrollflater. RMSE mellom laserdataene og kontrollflatene var 3.4 cm. Horisontalt koordinatsystem er Euref89, UTM-sone 32. Høydesystem er NN1954. Gjennomsnittlig punkttetthet for punktskyen er ca. 2

pkt./m². Punktene var klassifisert som bakke (*ground*) og ”ikke bakke”.

3.3.2 Oslo

Laserdata som dekker Oslo ble levert av Blom Geomatics AS, og samlet inn av Bloms søsterselskap TopEye. Flygningene, utført med helikopter, fant sted fra 19.7-06.10.2011. Instrumentet som ble benyttet var et TopEye system S/N 700. Etter innsamling ble data bearbeidet ved justering av feil i GPS- og INS-data, korreksjoner mellom laserstripene, samt høydeavvikskontroll mot kontrollflater. Standardavvik mellom laserdataene og kontrollflatene var 2.9 cm.⁶ Horisontalt koordinatsystem er Euref89, UTM-sone 32. Høydesystem er Oslo lokal. Gjennomsnittlig punkttetthet for punktskyen er ca. 43 pkt./m². Punktskyen var blitt klassifisert i følgende klasser: bakke (*ground*), vegetasjon (lav, middels og høy), støy, vann og ”ikke bakke”.

3.4 Referansedata: GNSS-målte kontrollpunkter

Til kontroll av den absolutte nøyaktigheten til digitale høydedata bør det, som nevnt over, måles opp kontrollpunkter med en vesentlig bedre nøyaktighet enn dataene som skal kontrolleres. Til denne undersøkelsen ble kontrollpunktene målt opp ved hjelp av satellittbaserte posisjonssystemer, nærmere bestemt RTK (Real Time Kinematic). Såkalt tradisjonell RTK går ut på at man måler samtidig med to GNSS-mottakere. Basemottakeren befinner seg i et punkt med kjente koordinater, og sender sine GNSS-målinger til en mottaker i bevegelse (rover). Roveren holdes i ro i noen sekunder, det gjennomføres et antall målinger hvis resultater midles. Ved koordinering av de to mottakerenes målinger bestemmes vektoren mellom dem. I følge Statens kartverk (2009b) bør RTK-målinger gjentas flere ganger for å unngå korrelasjon i tid mellom målingene, noe som gir lavere pålitelighet. Derfor bør målingene gjentas, f.eks. ved to målinger med minimum 45 minutters intervall.

I oktober og november 2012 ble det målt til sammen 145 kontrollpunkter vha. RTK. Base ble innmålt på taket av Geologibygget, Blindern, ved hjelp av noen av Oslo kommunes fastmerker, definert i høydekoordinatsystemet Oslo lokal. RTK-punktene ble målt opp innenfor en radius på ca. 1 km. fra basestasjonen. 80 av RTK-punktene ble målt to ganger, typisk i punkter som lot seg gjenfinne ved annen gangs besøk, som kumlokk og veimerker. De resterende punktene ble bare besøkt én gang, men ble målt to ganger med kort tidsintervall, der roveren ble nullstilt mellom de to målingene. Vektorene til de to målingene pr. punkt ble deretter utjevnet i programmet GIS/LINE landmåling. Midlere nøyaktighet i høyde gitt som

⁶RMSE var ikke oppgitt i dette tilfellet.

standardavvik beregnet i utjevningen var 0.6 cm.

3.5 Programvare: Match-T DSM

Programserien Match-T fra Inpho har en lang historie som hva man kan kalle et tradisjonelt matcheprogram som fremstilte DTM'er gjennom areal- og objektbasert matching, der objekter som bygninger og vegetasjon ble filtrert bort etter at parallaksemålingene var utført. Ved utgave 5.1 skiftet programmet navn til Match-T DSM, og som navnet antyder fikk brukeren da anledning til å generere digitale overflatemodeller. I denne utgaven var multippel stereomatching implementert: Av Lemaire (2008) fremgår det at algoritmen kan utnytte høy bildeoverlapp; det produseres flere sett med høydedata for et gitt areal (ved matching av flere bildepar), og resultatene av denne multiple matchingen kombineres. I tillegg er programmet i stand til å velge ut bildeparene med best innsynsvinkel til de objektene som skal matches.

Match-T DSM er fremdeles ett av få kommersielle dataprogrammer som kan ses i sammenheng med den tidligere nevnte utviklingen innen tett matching. Andre programmer i samme kategori er tidligere nevnte NGATE fra BAE Systems, samt LPS eATE fra Erdas og UltraMap DenseMatcher fra Microsoft. Intergraph lanserer Image Station Automatic Elevations – Extended våren 2013, der SGM er implementert.

I følge Heuchel, Köstli, Lemaire & Wild (2011) var utviklingen av Match-T DSM 5.4, som ble lansert i 2011, drevet av bl.a. markedets ønske om bedre støtte for generering av sanne ortofoto samt (markedets ønske om) økt kvalitet i områder med lite bildetekstur. I tillegg fokuserte forfatterne på økt punkttetthet, redusert støy og raskere prosessering i versjon 5.4 i forhold til versjon 5.3. Versjon 5.5 kom i august 2012, og er bare kort beskrevet av produsenten; matchingen skal bl.a. fungere bedre i skyggepartier og områder med dårlig tekstur (Inpho GmbH 2012b).

Utgave 5.5 benytter seg stadig både av MKM og objektbasert matching (Förstner-operator og kantoperator). Videre er teknikken hierarkisk og arbeider på bildepyramider. Høydemodellen genereres også gjennom flere pyramidenivåer. Algoritmen begynner med å generere en flat DHM, som så gradvis får høyere kompleksitet gjennom de lavere pyramidenivåene. Typisk benyttes den mer robuste objektbasert matchingen for å generere en ”grunn-DHM” på de høyeste pyramidenivåene. Dersom den objektbaserte matchingen oppnår tilfredsstillende resultater, vil programmet typisk skifte til MKM-matching.

For den mest detaljerte matchingen på de laveste pyramidenivåene benyttes en teknikk som Inpho har gitt navnet Cost-Based Matching (CBM), og som beskrives

slik:

”For each pixel of one image the corresponding pixel in the second image to match is searched through a path in a so-called 3D-cost-cube. A variety of cost functions [...] are considered to find the way along a minimum cost path. Each direction in the 3D-cost-cube represents a x-y movement in the image to match. Finding the pixel with the lowest cost generates a lowest-cost 3D model – our surface model. Unlike propagated Semi-Global-Matching techniques, MATCH-T does not use mutual functions (e.g. to compensate for color changes etc.) and it extracts points only every 3rd pixel as a default.” (Inpho GmbH 2012a, s. 84)

Ut fra dette synes det ganske klart at CBM er inspirert av algoritmene omtalt i seksjon 2.3.5, særlig mtp. akkumulering av kostnader langs ”stier”. I en e-postkorrespondanse mellom undertegnede og Inpho beskrives dessuten CBM som en ”semi global matching approach” (se appendikset).

Øvrige komponenter som må nevnes er programmets varierbare parametre. Man kan velge å generere enten DTM eller DOM. I førstnevnte tilfelle er standard-utdata en grid-modell der trær og bygninger er forsøkt filtrert bort, dvs. en ”klassisk” matchet terrengmodell. Hvis man velger DOM, resulterer dette i en punktsky på LAS-format. En annen viktig parameter er *terrain type* – heretter kalt ”terrengtype” – der man angir hvilken type terreng som dekkes av bildene som skal matches. Alternativene her er *flat*, *undulating*, *mountainous* og *extreme*. For DOM-generering anbefales å velge et av de to siste alternativene.

Valget man gjør angående terrengtype er bestemmende for programmets automatiske valg av en annen parameter, *parallax threshold*. Denne parameteren angir størrelsen på x-parallaksen som det søkes etter homologe punkter innenfor. Store høydeforskjeller på overflaten gjør det nødvendig å sette en høy verdi for parallax threshold. Utvikleren advarer imidlertid mot at dersom verdien settes for høyt, øker faren for feilmatching (Inpho GmbH 2012a).

En tredje viktig parameter er *smoothing* (glatting), som bestemmer hvor mye høydemodellen glattes, dvs. hvor mange detaljer fra selve matchingen som beholdes eller filtreres vekk. Dersom man velger lav glatting, som er anbefalt for DOM-generering, vil kantdeteksjon inngå som en del av matcheprosessen.

Ytterligere en parameter som bør nevnes er *feature density* – heretter kalt ”objekttetthet” – som bestemmer hvor tett, målt i pikselrader i de epipolare bildene, det skal ekstraheres objekter/features som skal benyttes videre i matchingen. Dersom

man velger *dense*, som er anbefalt for DOM-generering, ekstraheres objekter fra hver pikselrad.

I tillegg bør parameteren *strip constraint* – hetter kalt ”stripetvang” – nevnes. Dersom denne funksjonen er aktivert, vil programmet bare matche et gitt bilde mot bilder i samme flystripe. I dokumentasjonen til programvaren forklares det at eldre matcheteknikker krevde multiple stereomodell-kombinasjoner for å kunne detektere tilstrekkelig antall punkter langs med/på tvers av objekter som løper parallelt med epipolare linjer. Med teknikkene som benyttes i Match-T DSM 5.5 er dette ikke lenger nødvendig, og faktisk heller ikke anbefalt. Årsaken er at piksel-for-piksel-matchingen som anvendes er meget sensitiv overfor skygger som beveger seg fra en flystripe til den neste. I følge programdokumentasjonen resulterer benyttelse av stripetvang til resultater som er ”more stable and the solution is faster” (Inpho GmbH 2012a, s. 32). Dette til tross for at antall bilder som kan benyttes i matchingen av et gitt objekt/piksel dermed går ned. Imidlertid bemerkes det samtidig at i områder med mange høye bygninger vil det være nødvendig med 60% eller mer sideoverlapp for å kunne se overflaten.

Man kan også velge om det er *speed*, *balance* eller *precision* som skal optimeres i prosesseringen. Det sistnevnte valget gir høyest nøyaktighet, bl.a. ved at mengden bildekombinasjoner som matches varieres etter behov. Dette fører naturlig nok til økt tidsforbruk.

Programmet utfører også en rutine som leter etter grove og mindre feil (*gross/minor errors*) i dataene. Det er mulig å velge hvor mange iterasjoner som skal gjennomføres i disse søkene. Maksimalt antall iterasjoner i begge tilfeller er 10.

I tillegg til dette er det godt over 70 parametre som ikke er tilgjengelig via programmets ordinære grensesnitt. De fleste av disse parametrene er ikke spesielt interessante i denne sammenhengen, og innenfor rammene av denne oppgaven er det begrenset hvor mange ulike parametervarianter som kan testes. Parameteren *xydata*, beskrevet som ”[f]actor for XY spacing of 2.5D filtering” må imidlertid endres fra 3 til 1 dersom man ønsker å produsere en punktsky med tetthet tilsvarende GSD. Som nevnt vil standardinnstillingene ekstrahere ett punkt pr. 3 piksler.

Når programmet kjøres, produseres det (i tillegg til høydedata) en loggfil som inneholder en del informasjon om matchingen. Et kort utfrag fra en loggfil produsert ved en reell matching av 3 bilder kan se ut som utsnittet under. Følgende er hentet fra det laveste, mest detaljerte pyramidenivået der CBM-matchingen har blitt utført.

Number of processed MU	:	12882 / 100.0 [%]
Number of 1 - fold determined MU	:	11661 / 90.5 [%]
Number of 2 - fold determined MU	:	801 / 6.2 [%]
Number of 3 - fold determined MU	:	420 / 3.3 [%]

For hvert pyramidenivå i matchingen oppgis antall matcheenheter (*matching units*, forkortet MU). En MU oppgis som "the smallest area unit in which the matching part is done. One matching unit consists of 4 grid meshes" (Inpho GmbH 2012a, s. 70). Nøyaktig hva en *grid mesh* er, er ikke utdypet i programdokumentasjonen til Match-T DSM, men begrepet er nokså hyppig brukt innenfor litteraturen om bildematching (se f.eks. ZI Imaging Corp. (2010)), og betyr vanligvis en enhet med en fast størrelse som igjen inneholder et antall punkter (ekstraherte punkter/pikslar). Flere *grid mesh*'er utgjør det som i seksjon 2.3.6 ble omtalt som en *patch*. Linjene i utsnittet over angir hvor mange MU'er som er bestemt fra n modeller (bildepar). Dette er vitner om at programvaren utfører multippel stereomatching, dvs. at matcheentiter søkes gjenfunnet i flere modeller for å øke sikkerheten i matchingen. På de lavere pyramidenivåene blir normalt en større andel MU'er bestemt ved mer enn én modell enn hva som er tilfelle i eksempelet over. Det kan være verdt å merke seg at på det laveste, mest detaljerte nivået er sjelden mer enn 30% av MU'ene bestemt i mer enn én modell, selv ved meget høy overdekning.

En annen størrelse som oppgis i loggfilene er *estimated internal height accuracy (DSM)*, som angir "[r]elative [DSM] accuracy considering the redundancy of all matched points" (Inpho GmbH 2012a, s. 71). Denne variabelen vil bli oppgitt for de produserte punktskyene i de følgende undersøkelsene.

Punktskyen som til slutt produseres av Match-T DSM 5.5 interpoleres/filtreres fra en intern grid-DOM. Den endelige punktskyen kan *nesten* kalles en "grid-punktsky", da avstanden mellom punktene stort sett er lik, men den viser seg også å variere litt – avstanden kan f.eks. være litt større langs "radene" enn langs "kolonnene" i deler av punktskyen. Regulariteten i punktavstand er uansett mye større enn hva som er vanlig for punktskyer fra laserskanning. Der hvor programmet ikke er i stand til å matche punkter – f.eks. i dødvinkelsituasjoner – forekommer det hull i punktskyen.

Som nevnt tidligere har LAS-formatet muligheter for klassifisering av punkter, og Match-T DSM produserer tre ulike dataklasser: gode punkter (klasse 0); punkter med middels pålitelighet (klasse 13) som er interpolert fra få matchede punkter; og punkter med lav pålitelighet (klasse 14) som er interpolert fra veldig få eller ingen matchede punkter. Andelen punkter som faller i den første kategorien vil bli oppgitt i de følgende undersøkelsene.

3.6 Annen benyttet programvare

3.6.1 ArcGIS

ArcGIS er et omfattende GIS (geografisk informasjonssystem) for analyse og visualisering av geografisk informasjon, utgitt av Esri. I versjon 10.1 er mulighetene for behandling av LAS-punktskyer utvidet en hel del, sammeliknet med de tidligere versjonene. De fleste visualiseringene av høydedata i seksjon 4 er fra ArcGIS. I tillegg ble ArcGIS benyttet til interpolasjon ved sammenlikninger mellom høydedata som ikke hadde samme planimetriske koordinater. I disse tilfellene ble den innebygde interpolasjonsteknikken *natural neighbor interpolation* benyttet. Teknikken etablerer såkalte Voronoi-polygoner omkring punktene i nærheten av punktet som skal interpoleres. Deretter etableres et Voronoi-polygon omkring punktet som skal interpoleres, og overlappen mellom dette nye polygonet og de enkelte nabopolygonene benyttes for å bestemme hvor stor vekt hvert nabopunkt skal ha når høyden for det nye punktet bestemmes (ESRI 2012).

3.6.2 Image Station

Image Station er en fotogrammetrisk programvarepakke fra Intergraph. I arbeidet med denne oppgaven ble stereoprogrammet Stereo Display og vektordatabiblioteket Feature Collection benyttet for å tegne opp 3D-polygoner som igjen ble benyttet til utvelgelse av data fra de undersøkte punktskyene.

3.6.3 OrthoMaster og OrthoVista

OrthoMaster og OrthoVista er utgitt av Inpho GmbH. OrthoMaster genererer ortofoto fra bilder og høydedata, mens OrthoVista setter sammen ortofoto til ortomosaikker.

3.7 Maskinvare

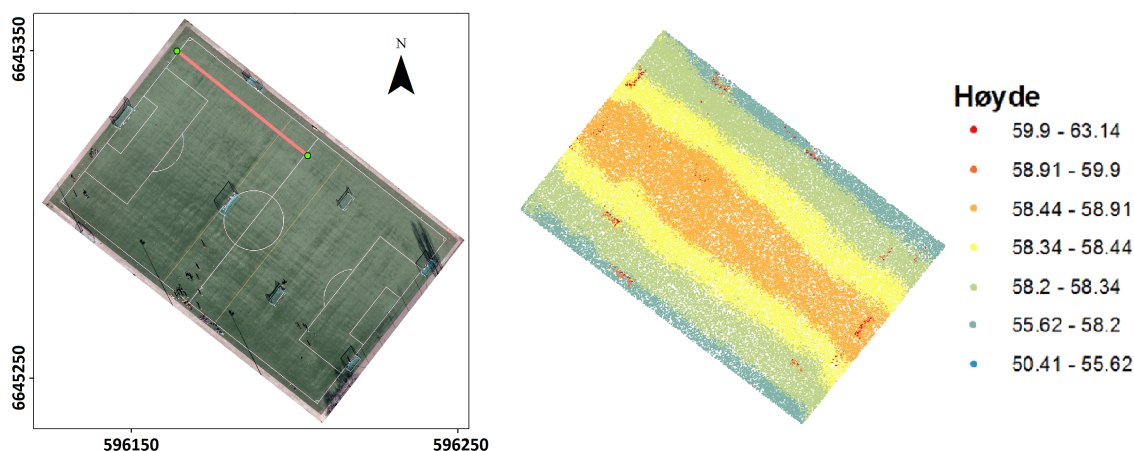
All generering av høydedata ble utført med en Intel Core i7-CPU med 4 kjerner og 8 tråder, 2.80 GHz klokkehastighet og 12 GB RAM. Under prosessering ble data lest fra og skrevet til en ekstern harddisk tilkoblet med USB 3.0. Dette er først og fremst relevant for genereringstiden for punktskyene, oppført i seksjon 4.

4 Undersøkelser og resultater

4.1 Effektene av ulike bildekonfigurasjoner over et lite testområde

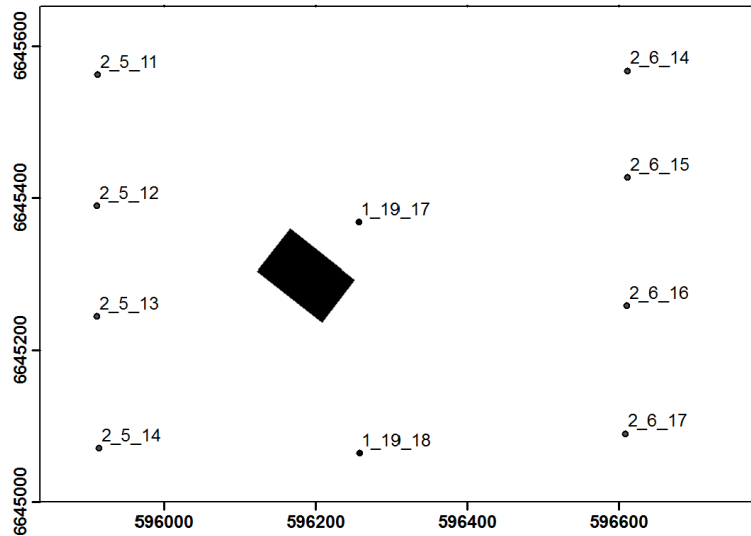
Inspirert av liknende undersøkelser i Haala (2009) og Haala (2011) gjennomgår denne seksjonen resultatene av matching av et mindre antall bilder over et lite område. Fordelen med denne typen undersøkelse er oversiktlig og mangel på kompliserende faktorer – innholdet i bildene som matches er lett å få oversikt over, hvilke bilder som matches med hvilke er kjent, dødvinkel kan unngås, etc.

Testområdet – Marienlyst kunstgress i Oslo – ligger innenfor testfelt Blindern-Majorstuen, beskrevet i seksjon 3.2.2, og har et areal på ca. 7960 m². Det kan forventes at selve fotballbanen er nokså flat, og jevnt avrundet mot de noe lavere langsidedekantene pga. drenering. Det er ikke spesielt mye bildetekstur på selve banen. Laserpunktskyens (se seksjon 3.3.2) gjengivelse av banen er visualisert i figur 20. Det er mennesker på deler av banen i bildene, og dette fører naturligvis til ulikheter mellom bildene som kan påvirke matchekvaliteten. Figur 21 viser eksponeringspunkter for et antall bilder som dekker Marienlyst kunstgress. De fleste av bildene som ble benyttet i denne undersøkelsen er fra 03.04 (flydag 2).



Figur 20: Venstre side: ortofoto (bilde 2.5_13) av Marienlyst kunstgress. Profillinje benyttet i undersøkelsen er tegnet inn. Høyre side: laserpunktsky som gjengir Marienlyst kunstgress

Tabell 1 viser resultater av matching av ulike kombinasjoner av bildepar som dekker nevnte fotballbane. I alle kjøring er DOM-punktsky valgt og presisjon er optimert. Terrenget satt til *extreme* og mengden glatting (*smoothing*) er satt til lav (ref. seksjon 3.5) – dette er neppe nødvendig, eller ideelt, for å gjengi en fotballbane, men disse innstillingene er valgt fordi de er fornuftige i en normal matching av urbane områder. Objektthet (*feature density*) er satt til høy og parameteren *xydata* er



Figur 21: Oversikt over bilder som dekker Marienlyst kunstgress (svart rektangel). Eksponeringspunkter for bilder markert som svarte prikker.

Konfig. nr.	Matchede bilder	B/H (ca.)	Antall pkt.	Punktklasse = 0 [%]
M1	2_5_12, 2_5_13	0.13	1 907 095	98.84
M2	2_5_11, 2_5_14	0.43	1 902 916	98.78
M3	2_5_13, 2_6_16	0.61	1 860 522	98.46
M4	2_5_13, 1_19_17	0.32	1 870 759	93.87

Tabell 1: Marienlyst kunstgress, resultater av matching mellom to bilder.

satt til 1, noe som ga punktskyer som på det laveste hadde en tetthet på 6.4 cm. Antall iterasjoner for deteksjon av grove og mindre feil er satt til det maksimale (10), noe som nok kan medføre at endel punkter med lav kvalitet er fjernet fra datasettene. Stripetvang ble ikke benyttet i noen av prosesseringene.

Som man kan se av tabell 1 er antall punkter i den resulterende punktskyen høyest i M1, der to nabobilder i samme stripe (bilde nr. 12 og 13 i stripe 5 fra flydag 2) er matchet. Antall punkter pr. m² er ca. 239.6 for M1. Antall punkter og antall punkter i klasse 0 (dvs. ”gode” punkter, ref. seksjon 3.5) er marginalt lavere i M2. Dette kan forventes ettersom større avstand mellom bildene gjør dem mer ulike hverandre. Punktmengden og antall ”gode” punkter går litt ned i M3, der to bilder fra ulike striper fotografert på samme dag har blitt matchet mot hverandre. Basis er imidlertid nokså lang i M3, så disse resultatene bør ikke være overraskende. M4, der to bilder fra ulike datoer er matchet, viser betraktelig lavere andel ”gode” punkter – dette til tross for at avstanden mellom eksponeringspunktene her ikke er spesielt lang.

I tabell 2 vises resultatet av matching av flere bilder. M5 er resultat av matching av 4 bilder, noe som gir flere punkter enn tilfellet var i tabell 1. Mer overraskende

Konfig. nr.	Matchede bilder	Antall pkt.	Punktklasse = 0 [%]
M5	2_5_11-2_5_14	1 908 386	99.14
M6	2_5_11-2_5_14, 2_6_14-2_6_17, 1_19_17-1_19_18	1 888 601	98.74

Tabell 2: Marienlyst kunstgress, resultater av matching mellom flere bilder

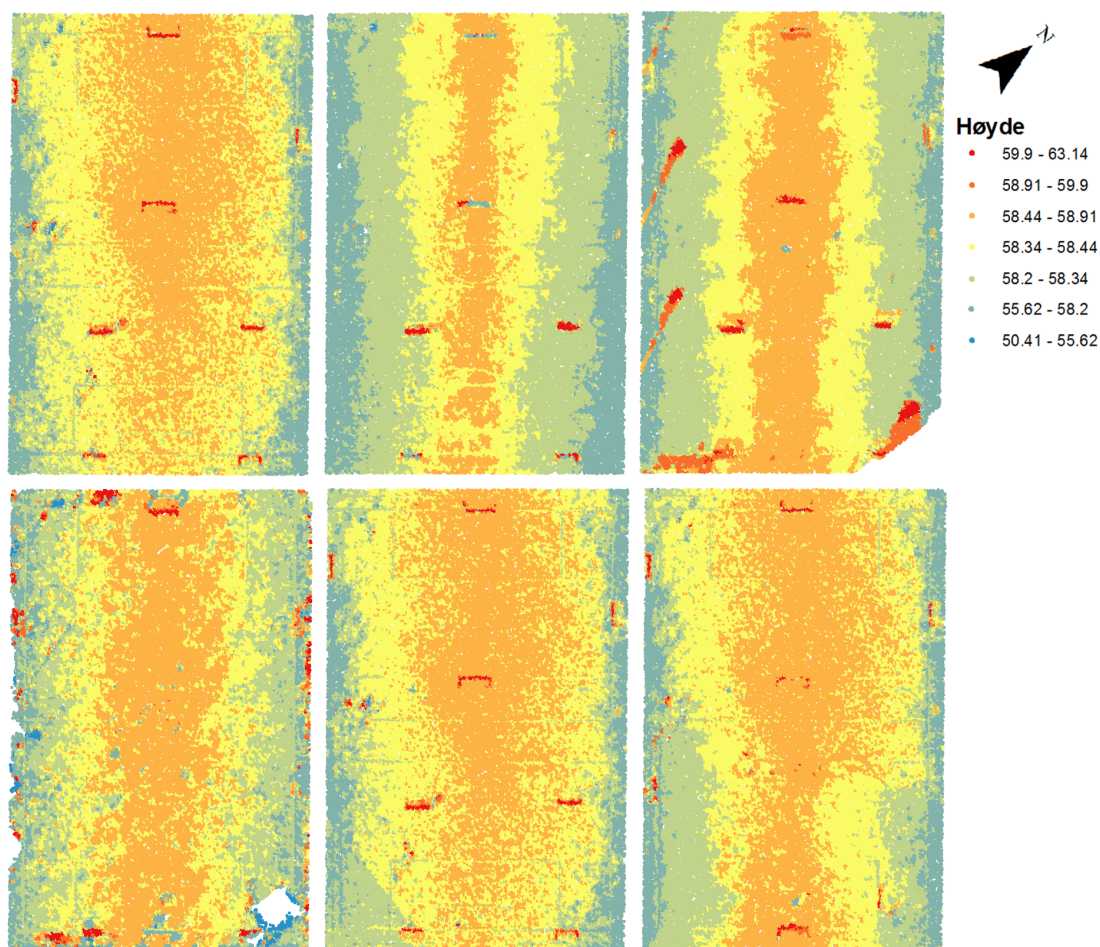
er det at inklusjon av fire bilder fra stripe 6 fra dag 2 samt to bilder fra stripe 19 fra dag 1 i M6 gir en punktsky med *færre* punkter enn M5, der også en lavere andel er klassifisert som gode. At matching mellom bilder fra ulike datoer gir færre og dårligere punkter, er ikke overraskende, men M6 inneholder tross alt mer informasjon (dvs.: flere bilder) enn M5.

For å få et bedre inntrykk av resultatene kan man betrakte visualiserte punktskyer. Figur 22 viser laserpunktskyer dannet med bildekonfigurasjonene M1-M6. Selve banen er mer støyete og mindre jevnt avrundet mot kantene i M1 enn i M2. Teoretisk skal høydenøyaktigheten være bedre i M2 enn i M1, fordi basis er lengre, jf. formel 5. Det kan også nevnes at verdien for *estimated internal height accuracy* (EIHA) i punktskyenes loggfiler er lavere for M2: 0.5 cm, mot 1.5 cm for M1. Likheten med laserpunktskyen i figur 20 er størst for M2. Tydelige feil er dog synlige i begge punktskyer. F.eks. er et par av tverrliggerene på målene i M2 plassert under bakken. Dette er bedre gjengitt i M1, antakelig fordi den større likheten mellom de matchede bildene gjør at matching av små, utstikkende detaljer fungerer bedre. Det finnes imidlertid også støypartier i M1, som synes å ha med at tettheten av mennesker på banen – området med flest mennesker har klart høyest tetthet av punkter som ikke faller i punktklasse 0.

M3, der to bilder fra ulike striper med relativt lang basis er matchet, har også en fint avrundet bane. Imidlertid ses noen tydelige feil som har å gjøre med at skyggene til trær, lysstolper langs banen, målstolper etc. har beveget seg. Disse partiene har høy tetthet av punkter som ikke faller i punktklasse 0. M4, der det har gått noen dager mellom fotografering av de to bildene, har det aller mest støyete resultatet. I likhet med M3 forekommer tydelige hull i punktskyen, f.eks. i nedre høyre hjørne, antakelig som følge av at bildene er så ulike hverandre at det ikke lar seg gjøre å finne punkter som kan matches. Store forskjeller mellom hvilke objekter som befinner seg på samme sted på bakken gir mange artefakter og mange punkter som ikke faller i kategori 0. EIHA er 0.8 cm for M3 og hele 2.6 cm for M4.

Når det gjelder M5, er denne punktskyen altså produsert med fire bilder fra samme stripe. Derfor er det litt overraskende å se likheten mellom M5 og M1, ettersom bildene fra M2 (som etter alt å dømme ga et bedre resultat for selve banen) også var inkludert i genereringen av M5. Bortsett fra at mengden punkter

går noe opp, og antall usikre punkter går noe ned (ref. tabell 1 og 2) finnes det intet som klart og tydelig indikerer en kvalitetsøkning i M5 relativt til M1 og M2. Det samme kan sies om M6, der hele 10 bilder har inngått i prosesseringen. Loggfilen til M6 viser imidlertid at hele 99.3% av matcheenhetene på det laveste pyramidenivået (ref. seksjon 3.5) ble beregnet fra bare én modell. Øvre del av M6 er nærmest identisk med M1 og M5. Nedre del av M6 har nok en bedre avrundet bane, noe som kan komme av at denne delen av banen befinner seg nærmere bildene 1_19_17 og 1_19_18, som har en relativt lang basis. Flytting av målene mellom de to flydatoene medfører endel støy i M6. EIHA er henholdsvis 1.1 og 0.8 cm for M5 og M6.



Figur 22: Øvre venstre: punktsky M1. Øvre midt: punktsky M2. Øvre høyre: punktsky M3. Nedre venstre: punktsky M4. Nedre midt: punktsky M5. Nedre høyre: punktsky M6.

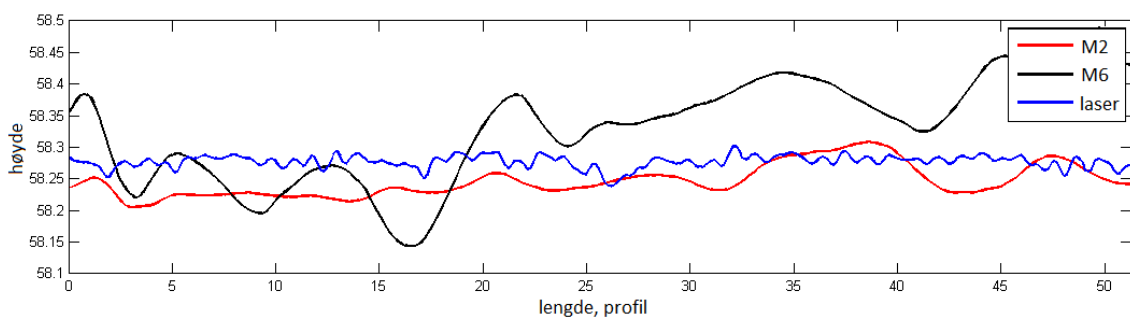
Profillinjer kan benyttes for å gjøre ytterligere en undersøkelse av kvaliteten på høydedataene. Punktskyene ble konvertert til grid-DOM'er med en oppløsning på 0.15 m. Konverteringen ble utført med verktøyet *LAS Dataset to Raster* i ArcGIS. Deretter ble det tegnet profillinjer med datapunkter langs banen i et område som

så relativt uendret/støyfritt ut mellom de ulike fotograferingstidspunktene (se figur 20). Linjene er drøyt 51 m lange og antall målepunkter er 341. Data for profillinjene er gjengitt i tabell 3.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Laser
Medianhøyde [m]	58.399	58.255	58.264	58.299	58.401	58.401	58.278
95%-intervallbredde [cm]	25.3	8.3	6.5	15.1	24.4	25.0	3.9
95% RMS-residual [cm]	5.2	1.5	1.4	3.5	5.0	4.9	0.9

Tabell 3: Statistikk for DOM-profillinjer langs Marienlyst kunstgress (n = 341).

Variasjonen i høyde er minst i profilene til M2 og M3, dvs. de to konfigurasjonene med nokså lang basis som også tilsynelatende ga de to beste gjengivelsene av fotballbanen (figur 22): Hvis de 2.5% høyeste og laveste høydeverdiene fjernes, er variasjonen hhv. 8.3 og 6.5 cm (se kolonnen 95%-intervallbredde). Tilsvarende for M5 og M6 er over 24 cm. DOM'en fra laserpunkttskyen gjengir til sammenlikning en langt jevnere overflate – her er tilsvarende intervall på bare 3.9 cm. Inntrykket er det samme hvis man ut fra profilpunktene foretar en minste kvadraters tilpasning til en rett linje og beregner RMS for de 95% av punktene med minst avvik fra denne linjen (kolonnen 95% RMS-residual): Avvikene er over tre ganger så store for M5 og M6 som for M2 og M3, mens laser-DOM'en igjen framstår som jevnest. Den høyere støymengden i M6 bekreftes også i figur 23, der profilene M2 og M6 er plottet mot profilen fra laser-DOM'en. Laserprofilen har riktig nok mer ”høyfrekvent” variasjon, men ”amplituden” til utslagene er mindre enn hva tilfellet er for profilene fra M2 og særlig M6.



Figur 23: Plott av profillinjer for M2-, M6- og laser-DOM.

4.2 Fullstendighet og punkttetthet

Hensikten i denne seksjonen er å undersøke fullstendigheten til punktskyer produsert med tett bildematching over norsk bymiljø. Det blir forsøkt generert punktskyer med punkttetthet tilsvarende GSD. Deretter blir variasjonen i punkttetthet over testområdene kvantifisert. Det blir gjort observasjoner av forekomsten av hull i datadekningen. For å observere hva bildeoverlapp har å si for fullstendighet, vil resultatene av ulik bildeoverlapp samt benyttelse av stripetvang undersøkes.

Som et innledende eksempel på hva som kan produseres med siste generasjons programvare for bildematching viser figur 24 en punktsky fra Match-T DSM. Ved hjelp av tilleggsprogramvare som bl.a. følger med Inpho GmbHs fotogrammetriske programvarepakke kan punktene gis farger fra bildene som ble benyttet til å produsere punktskyen. Eksempelet består av ca. 75 millioner punkter, og kan raskt og enkelt fremstilles (ila. ca. 1 time, fargelegging inkludert) dersom bildemateriale og programvare foreligger.



Figur 24: 3D-visualisering av punktsky, der punktene er gitt farger fra bildene som inngikk i matchingen. Drammen sentrum omkring Bragernes torg.

To av testfeltene ble valgt ut til undersøkelse av fullstendighet/punkttetthet. Innstillingene i Match-T som ble benyttet i alle tilfellene var som følger (se seksjon 3.5 for forklaring av termene):

Produkttype: DOM-punktsky

Terrengtype: ekstrem

Optimér: presisjon

Glatting: lav

Objekttetthet: tett

xyfactor: 1.0

Antall iterasjoner for deteksjon av grove og mindre feil er satt til det maksimale (10), noe som nok kan medføre at endel punkter med lav kvalitet er fjernet fra datasettene.

4.2.1 Drammen sentrum

De første eksemplene er fra testområde Drammen sentrum, nærmere beskrevet i seksjon 3.2.1. Det ble generert tre punktskyer, alle med utstrekning tilsvarende nevnte testfelt. Til produksjon av punktskyene DS og DSS ble alle 37 bildene, med overlapp på 60/60, som delvis dekker testfeltet benyttet. Den eneste forskjellen mellom DS og DSS var at det i sistnevnte ble benyttet stripetvang (ref. seksjon 3.5). For DS6020 ble bildene i annenhver flystripe fjernet, slik at overlapp ble 60/20 i stedet for 60/60. Antall bilder benyttet, hvorvidt stripetvang ble valgt, punktavstand, samt informasjon lest ut av loggfilene, er gjengitt i tabell 4. Det fremgår at antall punkter som ikke betegnes som "gode" (ref. seksjon 3.5) er klart lavere for punktskyen generert fra færrest bilder, men til gjengjeld er *estimated internal height accuracy* (EIHA) noe bedre. Undersøkelsen i seksjon 4.1 tydet på at EIHA er relatert B/H-forholdet. Når bildeoverlappen synker, vil den gjennomsnittlige lengden på basis øke, noe som gir grunnlag for mer nøyaktige parallaxsemålinger. Ikke desto mindre kan det påpekes at all informasjonen i DS6020 er til stede i DS og DSS. I tillegg er det klart at benyttelse av stripetvang reduserer tidsbruken i prosesseringen vesentlig, noe som sannsynligvis har å gjøre med at antall mulige bildekombinasjoner er lavere.

	DS	DSS	DS6020
Antall bilder	37	37	21
Stripetvang	nei	ja	nei
Tot. ant. pkt.	339 127 785	339 118 464	337 688 800
Punktklasse = 0 [%]	92.43	93.01	88.20
EIHA [cm]	5.7	5.5	5.0
Tidsbruk	2 t 47 min	1 t 58 min	2 t 7 min

Tabell 4: Data for punktskyer, testfelt Drammen sentrum.

For å undersøke lokal punkttetthet ble verktøyet *LAS Point Statistics As Raster* i ArcGIS benyttet. Dette verktøyet kan telle opp antall punkter innenfor arealer av en gitt størrelse. Etter at punkttettheten var talt opp innenfor ruter på 1 m², ble prosentandelen av testområdet med punkttetthet høyere enn gitte nivåer beregnet. Resultatet av denne undersøkelsen er gjengitt i tabell 5. Deler av testområdet utgjøres av Drammenselva, noe som trekker gjennomsnittlig antall punkt pr. m² ned.

Derfor er vannområder fjernet fra undersøkelsene gjengitt i tabell 5. Det fremgår at den gjennomsnittlige punkttettheten er meget høy for alle tre punktskyer. Andelen av arealet med over 200 punkter pr. m² er litt lavere i DS6020, noe som tyder på at det forekommer endel hull i datadekningen.

	DS	DSS	DS6020
Maks. antall pkt. pr. m ²	216	216	216
Gjennomsnittlig antall pkt. pr. m ²	213.77	213.76	212.86
Areal med >214 pkt. pr. m ² [%]	97.02	96.18	91.52
Areal med >200 pkt. pr. m ² [%]	98.43	97.91	94.90
Areal med >150 pkt. pr. m ² [%]	99.66	99.50	97.01
Areal med >100 pkt. pr. m ² [%]	99.79	99.76	98.94
Areal med >50 pkt. pr. m ² [%]	99.94	99.94	99.71

Tabell 5: Statistikk for punkttetthet ved matching med ulik bildeoverlapp, testområde Drammen sentrum. Antall punkt er talt opp innenfor kvadrater på 1 m². Vannarealer er fjernet fra undersøkelsen.

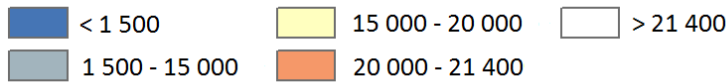
Figur 25 gir et inntrykk av den meget høye punkttettheten som er oppnåelig med tett bildematching. Det teksturfattige og mørke vannet er naturlig nok vanskelig å matche, og det er kanskje overraskende at det produseres punkter der overhode. Hull i punktskyen over vannflater viser uansett at hull ikke bare forekommer som følge av manglende innsyn, men også som et resultat av at matchingen ikke fungerer under visse forhold.

Det fremgår av figur 25, og synes å være en generell regel, at punkttettheten på land er litt lavere i områder dekket av vegetasjon, særlig der antall overlappende bilder er nokså lavt. Dette kan forventes, ettersom vegetasjon er en ikke-kompakt overflate som kan se ulik ut fra ulike observatørposisjoner (og følgelig kan være vanskelig å matche) i tillegg til at det finnes en viss sjanse for dødinkel. Andelen punkter som ikke faller i klasse 0 er også meget høy for denne overflatetypen. Tett bevokste arealer er forøvrig stort sett de eneste områdene der det produseres noe færre punkter i DSS enn i DS.

I selve byområdet inneholder nesten hele arealet av DS og DSS mer enn 99% av det maksimale antall punkter.

Når det gjelder hullene i DS6020, forekommer disse typisk i områder situert et stykke vekk fra sentrum i flystripene og utenfor sideoverdekkingsområdet, der matching mellom to ulike flystriper ikke er mulig, og der dødinkel fra bygninger medfører at 60/20-overlapp ikke er tilstrekkelig for å se overflaten i minst to bilder (figur 26).

Antall pkt. pr. 10 kvadratmeter



Figur 25: Punkttetthet for punktskyen DS. 10 m²-ruter med mer enn 21 400 punkter (ca. 99% av maksimalt antall punkter, 21600) er gjennomskiktige – dvs. at alle steder innenfor den svarte rammen der ortofotoet er synlig, er punkttettheten over 21 400 pr. 10 m². Punkttettheten er lavest over Drammenselva, mens punkttetthet mellom 20 000-21 400 pr. 10 m² på landjorden i all hovedsak forekommer i områder med vegetasjon.

4.2.2 Oslo sentrum

Samme type undersøkelse ble utført i testfelt Oslo sentrum. Det ble generert 4 punktskyer med utstrekning tilsvarende testfeltet. Innstillingene mtp. terrengtype, optimering, etc. var de samme som ble benyttet i testfelt Drammen sentrum. Til fremstilling av punktskyene OS og OSS er bilder fra begge fotograferingsdager benyttet, mens OSS8040 og OS6040 er fremstilt ved matching av bilder fra hhv. flydag 2 og 1 (Som nevnt var bildeoverlapp langs stripene høyere under den andre flydagen). I to av prosesseringene ble det benyttet stripetvang. Antall bilder og øvrige data er gjengitt i tabell 6.⁷

⁷Det kan nevnes at det også ble generert en punktsky tilsvarende OS, med de samme bildene, men med 16 bits i stedet for 8 pr. kanal, i en forventning om at økt radiometrisk oppløsning ville gi enda bedre resultater. Utdataene lå imidlertid så tett opptil OS, både mht. antall punkter og punktenes plassering, at det ikke syntes hensiktsmessig å inkludere denne punktskyen



Figur 26: Eksempel på hull i punktskyen DS6020. Punktskyen er gitt farger fra flyfotografiene. Hull i punktskyen er gjengitt som røde områder.

	OS	OSS	OSS8040	OS6040
Antall bilder	68	68	45	23
Stripetvang	nei	ja	ja	nei
Tot. ant. pkt.	404 538 215	405 572 435	404 795 852	399 351 437
Punktklasse = 0 [%]	95.4	94.9	94.6	89.5
EIHA [cm]	4.8	5.3	5.5	3.7
Tidsbruk	2 t 50 min	2 t 13 min	2 t 1 min	2 t 30 min

Tabell 6: Data for punktskyer, testfelt Oslo sentrum.

Enkelte av opplysningene i tabell 6 er ikke oppsiktsvekkende: Som for testfelt Drammen sentrum er antall ”gode” punkter flere ved høyere overlapp. Antall punkter er lavest for OS6040. Mer overraskende er det at OSS og OSS8040 inneholder flere punkter enn OS, men dette harmoniserer med resultatene fra seksjon 4.1, der det ble vist at matching mellom bilder fra ulike striper kunne resultere i lavere antall punkter. Sannsynligvis ville resultatet for OS blitt bedre dersom alle bildene i prosjektet var fra samme dag. Igjen er det tydelig at stripetvang gir raskere prosessering. I tillegg er det verdt å merke seg at EAIH-verdien til OS6040 er klart lavere enn for de andre punktskyene, noe som følger av lengre gjennomsnittlig baselinje.

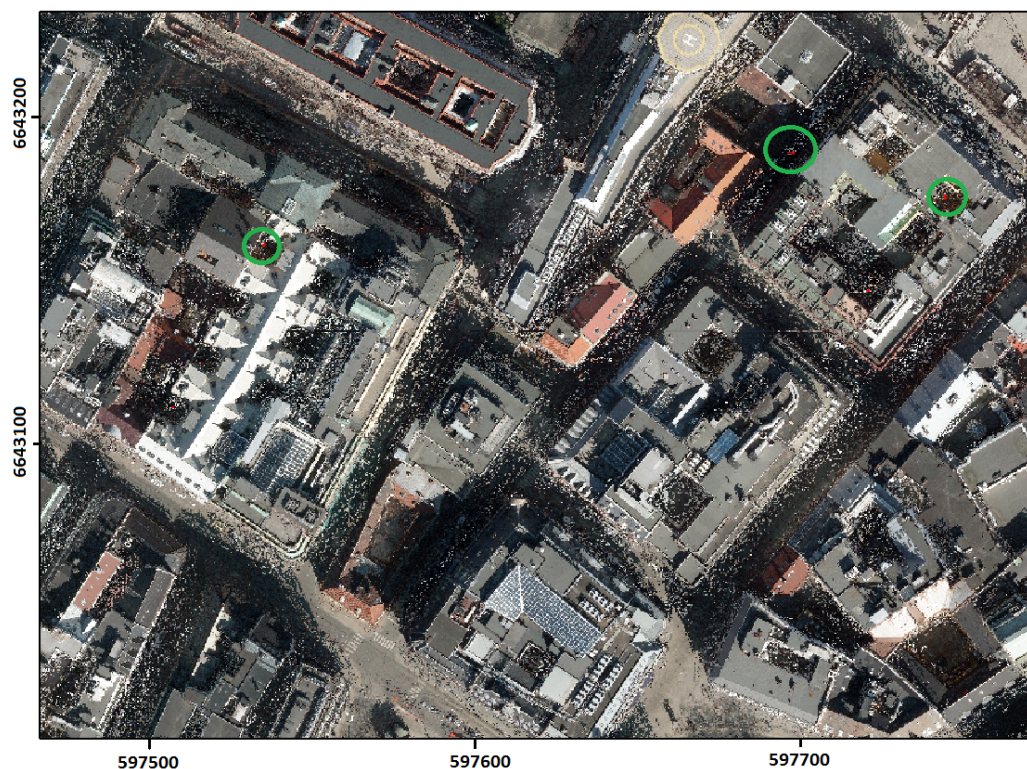
Statistikk for punktproduksjonen er gjengitt i tabell 7. Et lite område dekket av vann i Oslo havn er fjernet fra undersøkelsen. Tabellen viser den meget høye i undersøkelsene.

	OS	OSS	OSS8040	OS6040
Maks. antall pkt. pr. m ²	240	240	240	240
Gjennomsnittlig pkt. pr. m ²	237.27	237.87	237.42	234.22
Areal med >238 pkt. pr. m ² [%]	95.33	96.43	96.35	91.07
Areal med >225 pkt. pr. m ² [%]	95.59	96.72	96.64	91.44
Areal med >200 pkt. pr. m ² [%]	97.31	97.45	97.43	95.53
Areal med >150 pkt. pr. m ² [%]	97.72	97.84	97.78	97.44
Areal med >100 pkt. pr. m ² [%]	98.46	98.56	98.53	98.51
Areal med >50 pkt. pr. m ² [%]	99.32	99.43	99.39	99.37

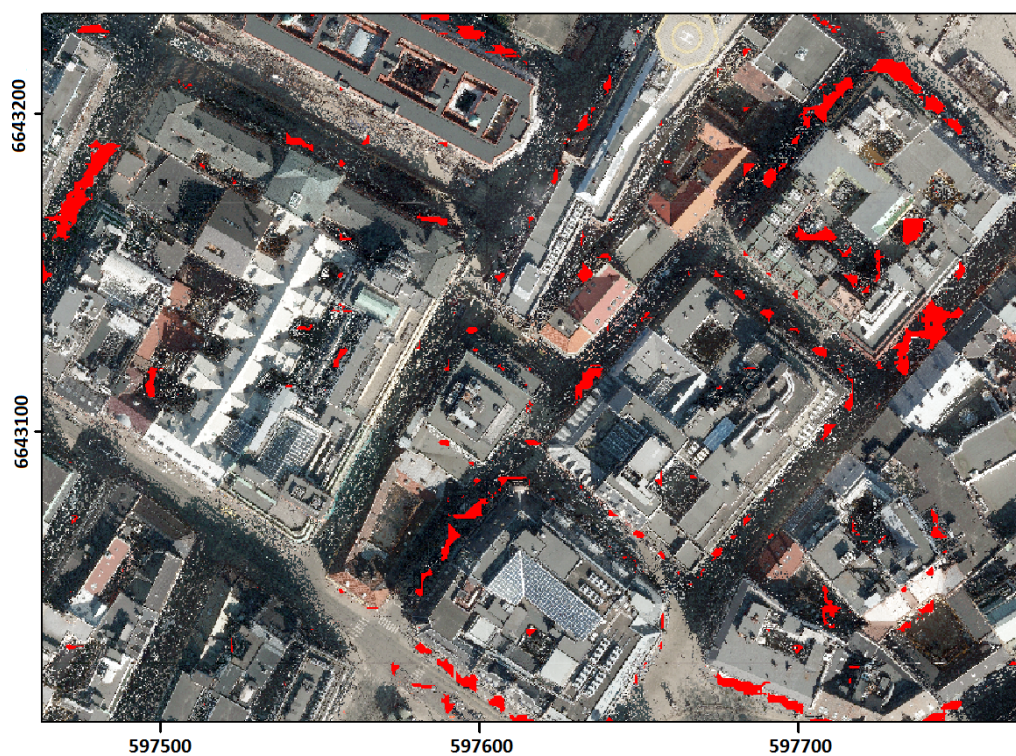
Tabell 7: Statistikk for punkttetthet ved matching med ulike bildeoverlapp, testområde Oslo sentrum. Antall punkter er talt opp innenfor kvadrater på 1 m². Vannarealer er fjernet fra undersøkelsen.

punktproduksjonen i et område som er betraktelig vanskeligere å matche, pga. større fare for dødsvinkel, enn Drammen sentrum. Gjennomsnittlig antall punkter er tett opptil det maksimale (240). Maksimalt antall punkter er litt høyere enn i testfelt Drammen, ettersom det i dette prosjektet ble flydd noe lavere (noe som gir lavere GSD). Det kan dog bemerkes at andelen 1 m²-celler med 225, 200, etc. punkter er *litt* lavere i dette testfeltet enn det forrige, noe som kan skyldes at dette området er mer problematisk mht. innsyn. 80/40-overlapp med stripetvang gir omtrent like resultater som benyttelse av fullt bildesett. Resultatene er også gode for OS6040, men andelen 1 m²-celler med virkelig mange punkter er endel lavere enn for de andre punktskyene, noe som kan tyde på at det forekommer hull. Figur 27 og 28 illustrerer fullstendigheten til punktskyene OSS8040 og OS6040 i et område mellom regjeringskvartalet og Youngstorget i nord og Stortorget i sør. Dødsvinkel fra bygninger (som typisk er ca. 25-35 m høye) gjør det vanskelig å matche objekter i gatene (typisk 10-15 m brede) mellom husene med 60/40-overlapp. 80/40-overlapp med stripetvang er imidlertid tilstrekkelig til å oppnå innsyn nærmest i hele området. Punktskyene OS og OSS er også praktisk talt uten hull i det samme området.

Figur 29 viser tilsvarende område slik det fremstår i laserpunktskyen som dekker Oslo. Sammenlikningen er nok ikke helt valid, siden hensiktene med flyfotoprosjektet og laserprosjektet mht. fullstendig innsyn i området kan ha vært ulike. Likevel er det åpenbart at lasersystemet ”svikter” enkelte steder. Dødsvinkel fra høye bygninger gir hull i dekningen av gater; skrå hustak reflekterer laserpulsene bort fra mottakeren; endel laserpulser passerer gjennom vinduer og returneres ikke – for å nevne de mest åpenbare problemene.



Figur 27: Eksempler på hull i punktskyen OSS8040. Punktskyene er gitt farger fra flyfotografiene. Noen meget små hull i rødt er innringet i grønne sirkler. OS og OSS gir omtrent tilsvarende resultat i dette området.



Figur 28: Eksempler på hull i punktskyen OS6040. Punktskyen er gitt farger fra flyfotografiene. Hull i punktskyen er gjengitt som røde områder.



Figur 29: Eksempler på hull i laserpunktskyen som dekker Oslo. Punktskyen er gitt farger fra flyfotografiene. Hull i punktskyen er gjengitt som røde områder.

4.3 Absolutt høydenøyaktighet

For kontroll av høydedata fra bildematching mot GNSS-punktene beskrevet i seksjon 3.4 ble det generert 3 punktskyer som dekket testfeltet Blindern-Majorstuen, og hvis data er gjengitt i tabell 8. Parameterinnstillingene var de samme som angitt i seksjon 4.2. Punktskyene BM og BMS ble generert med bilder fra begge flydager; det er verdt å merke seg at benyttelse av stripetvang ga noe færre punkter i dette tilfellet. BM6040 ble generert med bilder fra flydag 1; som vist i tabell 8 resulterte dette i lavere antall punkter, lavere andel punkter i punktklasse 0, men (i likhet med tilsvarende punktsky i testfelt Oslo sentrum) noe lavere EIHA.

Navn	BM	BMS	BM6040
Antall bilder	83	83	30
Stripetvang	nei	ja	nei
Tot. ant. pkt.	431 690 260	430 066 395	427 641 400
Punktklasse = 0 [%]	96.4	96.2	92.6
EIHA [cm]	4.1	4.5	3.7
Tidsbruk	2 t 8 min	1t 50 min	1 t 52 min

Tabell 8: Data for punktskyer, testfelt Blindern-Majorstuen.

Laserpunktskyen beskrevet i seksjon 3.3.2 ble også kontrollert med de samme GNSS-punktene. Siden det ikke er sammenfall mellom kontrollpunktene plantkoordinater og punktene i punktskyene, ble det interpolert høydeverdier for punktskyene i kontrollpunktene. Dette ble utført i ArcGIS og interpolasjonsmetoden som ble benyttet var *natural neighbor interpolation* (ref. seksjon 3.6.1). Resultatene er gitt i tabell 9. Standardavvik og 100% RMSE er tatt med her for å kunne relatere funnene til andre undersøkelser av tett bildematching (se seksjon 2.4 og 5.1).

Som det fremgår av tabell 9 er resultatene nær identiske for BM og BMS. Standardavvik og 100% RMSE ligger mellom 10-12 cm. Av den absolutte 95%-kvantilstatistikken fremgår det at det finnes endel avvik over ca. 20 cm. Det er ingen lett identifiserbare årsaker til disse store avvikene (som nærhet til høydesprang eller vegetasjon) men flere av punktene med størst avvik ser ut til å befinne seg i skyggepartiene i bildene. Ettersom høydedataene som undersøkes er "rå" og ubearbeidede og kan inneholde grove feil, bør dataene trimmes: Når de største avvikene ignoreres i 95% og 90% RMSE-statistikkene, blir resultatene hhv. 8 og 7 cm for BM og BMS.

BM6040 gir stort sett litt bedre resultater enn BM og BMS, noe som kan tilskrives litt lengre gjennomsnittlig baselinje. Dette er også illustrert i figur 30, der det f.eks. fremgår at avvikene i litt større grad er konsentrert i intervallet ± 10 cm. Det er imidlertid ikke grunnlag for å hevde at det er signifikante forskjeller

	BM	BMS	BM6040	Laser
Median	3.8 [-2.6, 13.5]	3.8 [-3.0, 12.2]	4.5 [-3.0, 12.2.0]	3.0 [1.3, 5.0]
95 k	22.1 [4.8, 65.5]	19.4 [4.7, 67.7]	20.9 [4.9, 72.4]	6.7 [3.0, 76.4]
σ	11.0 [2.3, 30.1]	10.7 [2.2, 31.8]	10.2 [1.7, 34.0]	7.2 [0.6, 35.2]
RMSE	11.8 [3.0, 29.8]	11.4 [3.2, 30.8]	10.9 [3.2, 32.8]	7.7 [2.1, 34.2]
95% RMSE	8.0 [2.9, 12.6]	8.0 [3.0, 12.3]	6.8 [3.0, 11.1]	3.4 [2.0, 4.7]
90% RMSE	7.0 [2.7, 10.7]	7.0 [2.8, 10.7]	5.9 [2.9, 8.3]	3.2 [2.0, 4.2]

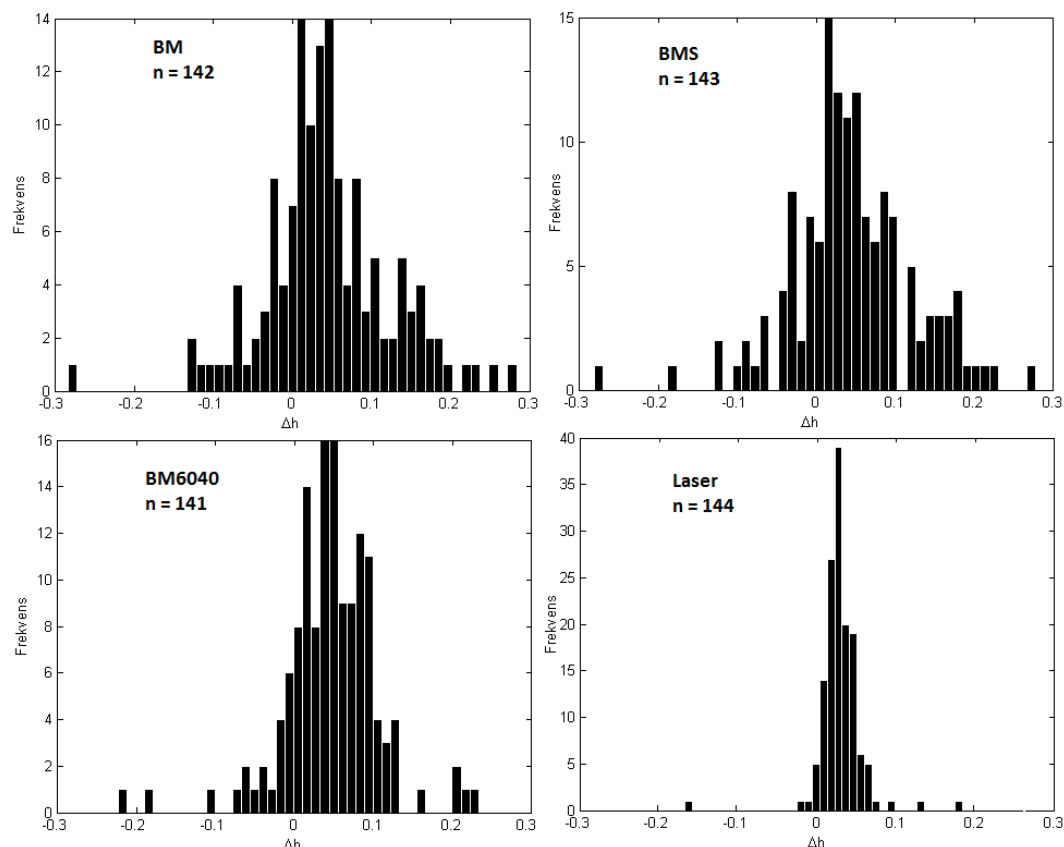
Tabell 9: Høydenøyaktighet for tre punktskyer generert vha. bildematching samt punktsky fra laserskanning. 95% konfidensintervaller i klammer. $N = 145$. Alle tall i cm.

mellom nøyaktighetsestimatene for BM6040 og BM/BMS på 5% nivå for noen av statistikkene, jf. konfidensintervallene.

Laserpunktskyen har gjennomgående de beste resultatene, til tross for at disse dataene ble samlet inn drøyt ett år før kontrollpunktene ble målt. Standardavviket og 100% RMSE påvirkes en del av noen få store uteliggere, der i alle fall den største (76.7 cm) har med vegetasjon over kontrollpunktet å gjøre (Mengden blader på trærne var langt større ved innsamling av laserdata i 2011 enn ved fotograferingen i 2012). Som det fremgår av den absolutte 95%-kvantilstatistikken er bare 5% av avvikene større enn 6.7 cm. Utelating av de få store avvikene medfører drastisk reduksjon i avvik fra 100% RMSE til 95% RMSE. Figur 30 viser den høye hyppigheten av meget små avvik i laserpunktskyen. Det er heller ikke signifikante forskjeller mellom nøyaktighetsestimatene for laserpunktskyen og BM/BMS/BM6040 på 5% nivå for noen av statistikkene.

Som nevnt viser medianverdiene i tabell 9, og dessuten histogrammene i figur 30, at kontrollpunktene generelt ligger noe lavere enn punktskyene. Antallet negative Δh er hhv. 34, 34, 22 og 7 (av $n = 145$) for hhv. BM, BMS, BM6040 og laserpunktskyen. Dette kan betraktes som systematiske avvik, men er innenfor en størrelsesorden som ikke er oppsiktsvekkende for data innfanget og orientert vha. de aktuelle teknikkene. Hvis det antas at systematiske avvik er identiske over hele kontrollområdet kan man få et inntrykk av høydepresisjonen til dataene ved å justere Δh tilsvarende størrelsen på medianen (dvs. trekke fra 3.8 cm fra alle Δh i BM, etc.).⁸ Resultatene er gjengitt i tabell 10. Som det fremgår av tabellen er resultatene atskillig bedre for

⁸Dette er selvsagt en lite sofistikert bearbeiding av data, men metoden kan forsvares ved at kontrollpunktene er distribuert over et relativt begrenset område.



Figur 30: Histogram for avvik Δh ved GNSS-kontroll av punktskyer fra bildematching og laserskanning. Av hensyn til visualiseringen er avvik større enn 0.3 m utelatt fra histogrammene; antall avvik mindre enn 0.3 m er angitt med "n" i histogrammene.

laserpunktskyen enn for punktskyene fra bildematching. Bortsett fra 90% RMSE for BMS og laserpunktskyen er det imidlertid også her overlapp mellom 95% konfidensintervallene.

	BM	BMS	BM6040	Laser
95% RMSE	6.9 [2.3, 10.9]	6.7 [2.3, 10.5]	5.0 [1.8, 9.0]	1.6 [0.6, 2.5]
90% RMSE	6.0 [2.1, 9.2]	5.9 [2.2, 9.1]	4.0 [1.7, 6.0]	1.4 [0.6, 2.1]

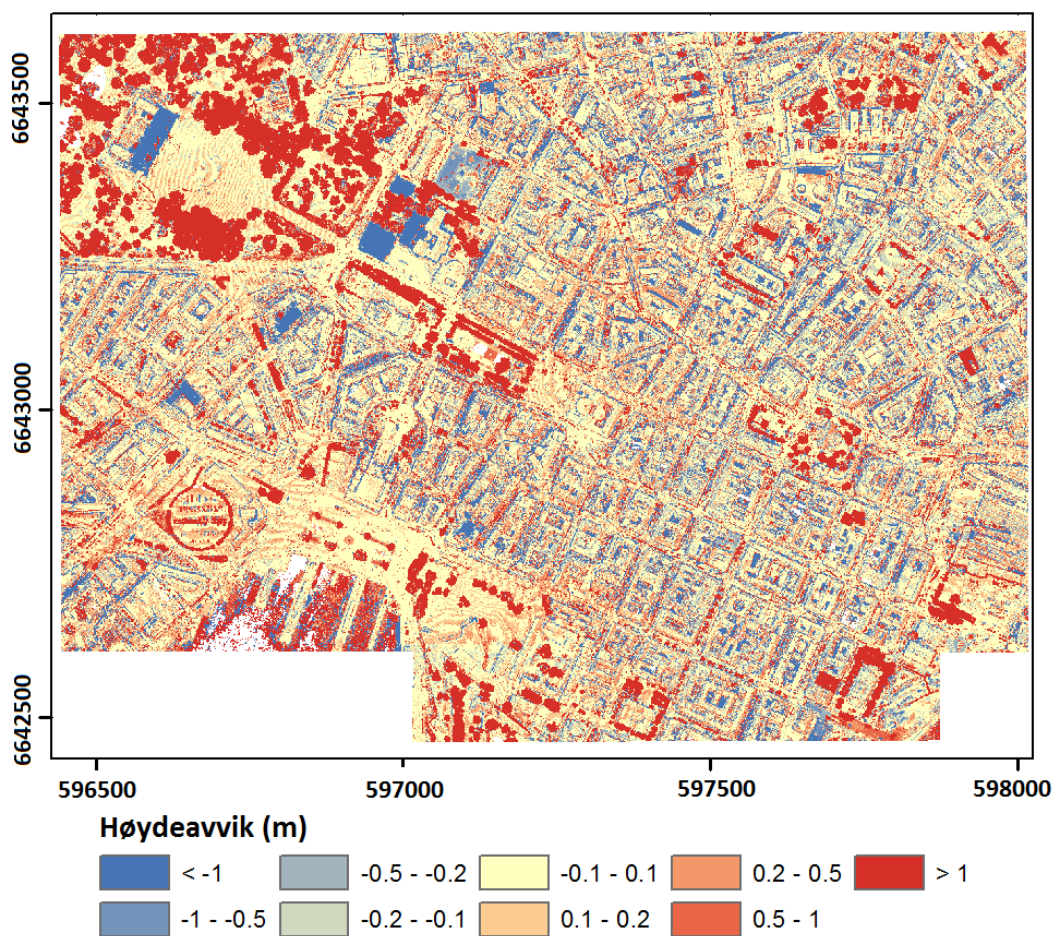
Tabell 10: Høydepresisjon etter justering tilsvarende median for tre punktskyer generert vha. bildematching samt punktsky fra laserskanning. 95% konfidensintervaller i klammer. N = 145. Alle tall i cm.

4.4 Relativ høydenøyaktighet – sammenlikning med høydedata fra laserskanning

For å gi et inntrykk av høydenøyaktigheten til punktskyer fra bildematching over et større areal, kan dataene sammenliknes med laserpunktskyene beskrevet i seksjon 3.3. Dette er en relativ nøyaktighetskontroll der de fotogrammetriske punktskyene blir sammenliknet med det som er dagens ”industristandard” for høydedata. Konfidensintervaller er ikke inkludert i resultatene i denne seksjonen, for å begrense informasjonsmengden noe.

For å kunne gi et generelt overblikk over avvikene mellom høydedata fra laserskanning og bildematching ble laserpunktskyen nevnt i seksjon 3.3.2 og punktsky OS (se øverst i seksjon 4.2) konvertert i ArcGIS til DOM’er med fast oppløsning på 0.3 m. *Natural neighbor interpolation* ble benyttet for å danne grid-modeller fra de irregulære punktskyene. Alle punkter fra punktskyene var inkludert i konverteringene, dvs. at annen-, tredje- og fjerdereturdypunktene i laserpunktskyen også var med. Deretter ble OS-DOM’en subtrahert fra laser-DOM’en i samme program. Resultatet er gjengitt i figur 31. Se figur 19 for et fotografisk inntrykk av testområdet. Store avvik forekommer i områder med mye høy vegetasjon – selv om laserskanning skal ha større evne til å trenge gjennom vegetasjon, var mengden blader på trærne så mye større på ettersommeren 2011 enn våren 2012 at laserpunktskyen stort sett er høyest. Områdene med trær bør ikke anses som sammenliknbare i dette tilfellet. Andre store avvik vitner om bygge- og anleggsaktivitet i Oslo sentrum i perioden mellom de to datainnsamlingstidspunktene. På flate, åpne arealer er avvikene ofte mindre enn 0.1 m. Gater og bakgårder dekket av skygge under fotografering har betraktelig større avvik. Det samme gjelder for områder med store vertikale sprang, f.eks. kanten av bygninger. Noen av disse avvikene skyldes planimetriske avvik mellom høydedataene som sammenliknes, men endel henger sammen med hvordan bygningene modelleres i de to ulike teknikkene. Mye av det som indikeres i figur 31 vil bli tatt opp videre i denne seksjonen, og i senere seksjoner, og vil derfor ikke bli ytterligere kommentert her.

Siden avvikene åpenbart varierer etter hva slags overflater som sammenliknes, vil de etterfølgende undersøkelser bli oppdelt etter overflatetyper som det har noen hensikt å sammenlikne direkte. Punktskyene fra bildematching som var med i undersøkelsen av relativ høydenøyaktighet var de samme som er redegjort for i seksjon 4.2 og 4.3. Mindre testarealer ble valgt ut ved betraktning av de aktuelle flyfotografiene samt konstruksjon av polygoner i Image Station Stereo Display/Feature Collection. Laserpunktene som befant seg innenfor disse



Figur 31: Vertikale avvik mellom DOM fra laserskanning og DOM fra stereomatching (punktsky OS).

polygonene ble klippet ut fra de komplette punktskyene. Deretter ble det interpolert høydeverdier for laserpunktens horisontale (x,y) koordinater fra de fotogrammetriske punktskyene vha. verktøyet *Interpolate shape* i ArcGIS. Interpolasjonsmetoden som ble valgt var igjen *natural neighbor interpolation*.

Den første overflatetypen som sammenliknes er grøntområder. Det ble valgt testområder der det ikke var annen vegetasjon enn gress. Høyere vegetasjon og skyggepartier i bildene ble forsøkt unngått. Mange steder forekom strukturer og kontrast i gressoverflaten som burde gi godt grunnlag for matching. Faren for støypåvirkning (mennesker etc.) er lav, men eventuell ulik gjennomtrengningsevne for de to teknikkene samt ulik gresshøyde ved datainnsamling kan potensielt gi (små) utslag.

Resultatene for denne overflatetypen er gjengitt i tabell 11. De største avvikene har grøntområdene i Drammen, men endel av disse arealene hadde helling opp mot 15°, noe som kan gi vertikale avvik som følge av planimetriske avvik (se seksjon 3.1.2). For alle testfeltene i Oslo er 95% av avvikene under 14 cm, mens størrelsen

på 95% RMSE ikke overskrider 6.3 cm. For punktskyene som er generert med samme bilder og innstillinger bortsett fra hvorvidt stripetvang ble benyttet eller ei, er resultatene nær identiske. Igjen gir BM6040 bedre resultater enn BM og BMS. Resultatene til OS6040 er også en god del bedre enn de andre punktskyene i testfelt Oslo sentrum.

	n	Median	95 k	95% RMSE	90% RMSE
DS	20146	8.4	19.4	9.7	9.0
DSS	20146	8.4	19.5	9.7	9.0
DS6020	20146	5.9	19.5	8.5	7.7
BM	118482	0.0	10.9	4.7	4.2
BMS	118482	0.0	11.0	4.7	4.2
BM6040	118482	0.0	8.0	3.4	3.1
OS	83043	-3.0	13.4	6.3	5.7
OSS	83043	-3.0	13.9	6.3	5.7
OSS8040	83043	-3.0	13.9	6.3	5.7
OS6040	83043	-0.6	7.2	3.2	2.9

Tabell 11: Avvik mellom laserpunktskyer og punktskyer generert ved bildematching over grøntområder. Alle tall i cm.

Gjengitt i tabell 12 og 13 er avvik på veier og andre asfalterte overflater. Ulike lysforhold gir ulik mengde tekstur og kontrast i bildene, noe som kan forventes å påvirke matchekvaliteten. Derfor ble det valgt ut arealer i hhv. sol og skygge (Ettersom det var færre egnede områder med enn uten skygge, er punktantallet endel lavere for førstnevnte). Laseren påvirkes ikke av eksterne lysforhold på samme måte, og kan forventes å ha samme nøyaktighet både i sol- og skyggepartier. For å gjøre sammenlikningsgrunnlaget best mulig ble det forsøkt valgt ut testområder der det i bildene ikke ble observert overhengende vegetasjon, trafikk, mennesker eller annet som kan føre til store avvik mellom punktskyene. Et ytterligere tiltak for å fjerne eventuell støy i laserpunktskyen var at laserpunktene som ble benyttet i undersøkelsen bare befant seg i klassen bakkepunkter.

Generelt er resultatene i tabell 12 omtrent like gode som resultatene i tabell 11. Igjen gir punktskyene basert på 60/40-overlapp i Oslo de beste resultatene. Resultatene i tabell 13 er en god del svakere: 95% RMSE og 90% RMSE er typisk 2-4 ganger så høye som i tabell 12, og antallet avvik over 50 cm er i flere tilfeller betydelig. I tabell 13 er resultatene i hovedsak bedre for Drammen enn for testfeltene i Oslo. Resultatene for begge Oslo-testfeltene bærer nok preg av at det er vanskelig å etablere pålitelige (støyfrie) testområder i skyggepartier her, da mengden personer, trafikk, etc. er høy. På grunn av at antall bilder er såpass høyt i Oslo (pga. høy overlapp) er det vanskelig å garantere at undersøkelsesområdene er støyfrie i alle

bilder. Også i tabell 13 er resultatene best for en av punktskyene generert med 60/40-overlapp, BM6040.

	n	Median	95 k	95% RMSE	90% RMSE
DS	21893	3.5	16.2	6.9	6.2
DSS	21893	3.5	16.2	6.9	6.2
DS6020	21893	3.4	16.4	6.6	5.8
BM	59440	2.7	14.7	6.8	6.2
BMS	59440	2.7	14.7	6.8	6.2
BM6040	59440	2.2	10.6	4.3	3.8
OS	109026	-2.0	15.9	6.5	5.8
OSS	109026	-2.0	15.9	6.5	5.8
OSS8040	109026	-2.2	16.2	6.8	6.1
OS6040	109026	-0.4	10.6	4.0	3.5

Tabell 12: Avvik mellom laserpunktskyer og punktskyer generert ved bildematching over veier og andre asfalterte overflater uten skygge. Alle tall i cm.

	n	Median	95 k	95% RMSE	90% RMSE
DS	3781	7.6	34.3	13.0	11.4
DSS	3781	7.7	37.6	13.2	11.5
DS6020	3781	7.3	39.2	13.5	11.6
BM	20760	3.8	74.7	22.5	18.1
BMS	20760	3.7	81.0	23.9	19.0
BM6040	20760	1.8	43.5	13.0	10.5
OS	48662	0.5	60.7	18.9	15.4
OSS	48662	0.4	72.4	20.7	16.4
OSS8040	48662	-0.6	92.1	25.9	20.3
OS6040	48662	3.0	130.9	27.2	18.2

Tabell 13: Avvik mellom laserpunktskyer og punktskyer generert ved bildematching over veier og andre asfalterte overflater i skygge. Alle tall i cm.

En overflatetype der faren er høyere for store avvik er skrå takflater. Helningsvinkelen til saltak kan gi vertikale avvik som følge av planimetriske avvik mellom datasettene. Det at punktene gjerne befinner seg nær diskontinuiteter (store høydesprang fra tak til bakke) kan gi enda større høydeavvik av samme årsak. Dessuten vil laserpulser som treffer bygningsvegger gi store avvik dersom de sammenliknes med punkter fra stereomatching som gjengir bygningenes tak. Derfor ble det valgt ut laserpunkter som befant seg et stykke fra takflatenes periferi. Tabell 14 gjengir resultatet for skrå takflater med god tekstur. Tabell 15 gjengir resultatet for skrå takflater som enten hadde lite tekstur eller som var dekket av skygge i bildene.

Resultatene i tabell 14 er i enkelte tilfeller ca. like gode som i tabell 11 og 12, men

mer sprikende. Lavere planimetriske avvik mellom fotogrammetriske punktskyer og laserpunktsky kan antakelig forklare hvorfor avvikene er mindre i Oslo-testfeltene enn for punktskyene fra testfelt Drammen. Litt høyere medianverdier enn i de foregående tabellene henger mest sannsynlig sammen med at endel av veggpunktene i laserpunktskyen er blitt med i beregningene. Resultatene for DS6020, BM6040 og OS6040 for velteksturerte takflater viser (meget) høye 95%-kvantilavvik og 95% RMSE. Dette henger sammen med at noen få takflater ikke var gjengitt i disse punktskyene, som følge av dødvinkel, noe som gir enkelte meget store avvik. 90% RMSE-statistikken, der de fleste av disse avvikene er utelatt, viser imidlertid tilnærmet like gode resultater for DS6020 og OS6040 sammenliknet med hhv. DS, DSS og OS, OSS. 90% RMSE-resultatene til BM6040 er til og med litt bedre enn hhv. BM og BMS.

	n	Median	95 k	95% RMSE	90% RMSE
DS	1148	13.9	106.1	18.4	15.5
DSS	1148	13.8	148.9	21.8	15.8
DS6020	1148	13.2	518.8	69.2	16.4
BM	36646	5.8	26.3	9.7	8.5
BMS	36646	6.0	25.5	9.6	8.5
BM6040	36646	2.8	307.9	32.3	7.4
OS	87384	1.2	16.4	6.0	5.2
OSS	87384	1.2	16.5	6.1	5.3
OSS8040	87384	1.8	19.4	7.5	6.6
OS6040	87384	1.2	113.6	12.2	5.6

Tabell 14: Avvik mellom laserpunktskyer og punktskyer generert ved bildematching over skrå takflater med god tekstur. Alle tall i cm.

Videre viser større avvik i tabell 15 igjen at matchingen fungerer dårligere i partier med lite tekstur. Andelen avvik over 150 cm er i mange tilfeller betydelig, og 95% RMSE er i beste fall omtrent 30 cm. I tabell 15 er resultatene faktisk noe bedre for DS6020 enn for DS og DSS. Derimot gir BM6040 og OS6040 langt svakere resultater enn de andre Oslo-punktskyene. Hull i disse punktskyene kan bare delvis forklare dette; visuelle undersøkelser av punktskyene viser at mange av takene som er dekket av skygge er svært dårlig modellert (dvs. preget av tydelig feilaktige søkk og forhøyninger) i BM6040 og OS6040. I og med at resultatene for disse punktskyene er såpass gode over andre overflater, er dette noe overraskende. Det kan tenkes at resultatene har med kvaliteten på bildene å gjøre. Solen sto noe lavere på himmelen under fotografering 25.03, så skyggepartiene er litt større. Bildene fra 25.03 er imidlertid ikke tydelig mørkere i skyggepartiene enn bildene fra 03.04, og resultatene i tabell 13, som også gjaldt skyggeområder, er gode for BM6040

og OS6040. Takflatene som er undersøkt er også relativt godt spredt omkring i testområdene, så det er i liten grad årsak til å mistenke at resultatene har med f.eks. orienteringen av enkeltbilder eller enkeltstriper å gjøre. En fullgod forklaring synes å kreve en dypere innsikt i matchalgoritmene til programvaren enn hva som har vært mulig å oppdrive i arbeidet med denne oppgaven.

	n	Median	95 k	95% RMSE	90% RMSE
DS	1363	25.7	213.5	62.0	48.0
DSS	1363	26.0	213.1	66.0	52.2
DS6020	1363	21.4	188.2	56.0	43.1
BM	26670	8.0	144.6	30.3	20.0
BMS	26670	7.4	140.9	30.6	20.7
BM6040	26670	5.6	184.7	52.5	40.1
OS	65694	3.2	166.9	35.0	22.6
OSS	65694	3.3	154.4	33.7	22.4
OSS8040	65694	3.1	159.2	34.1	22.3
OS6040	65694	8.1	267.0	76.0	57.9

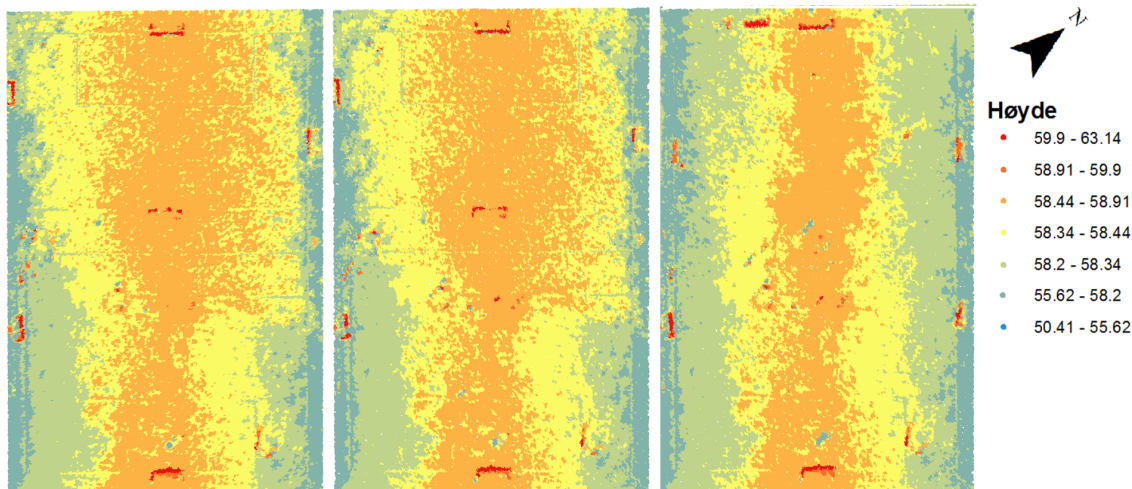
Tabell 15: Avvik mellom laserpunktskyer og punktskyer generert ved bildematching over skrå takflater med lite tekstur. Alle tall i cm.

4.5 Modellering av enkle overflater

I denne seksjonen vil gjengivelsen av enkle overflater, dvs. overflater uten store eller brå høydevariasjoner, bli nærmere undersøkt. Undersøkelsene i seksjon 4.4 sa en hel del om hva som later til å være bestemmende for kvaliteten til slike overflater. I denne seksjonen er hensikten å utdype dette bildet ved å påpeke og visualisere trekk ved gjengivelsen av enkle overflater i høydedata fra tett bildematching. Inntrykkene fra visualiseringene blir søkt bekreftet og konkretisert gjennom kvantitative målinger av nøyaktighet/støy. Eksempelene er hentet fra punktskyene produsert i de to Oslo-testfeltene (ref. seksjon 4.2 og 4.3).

Det første temaet som skal undersøkes er hvordan Marienlyst kunstgress (ref. seksjon 4.1) gjengis i punktskyene BM, BMS og BM6040. Til sammen 18 bilder dekker deler av banen hvis begge flydager tas med. 6 av disse er fra flydag 2. Som det fremgår av figur 32 er BM og BMS nærmest identiske med M6 fra seksjon 4.1, mens banen i OS6040 har større likhet med laserpunktskyen (figur 20) og de beste resultatene fra seksjon 4.1. For å kunne undersøke punktskyene kvantitativt, ble de konvertert til DOM'er med oppløsning på 0.15 cm, og det ble tegnet opp profiler tilsvarende profilene i seksjon 4.1. BM viste seg da å ha 95%-intervallbredde på 26.8 cm og 95% RMS-residual på 4.8 cm – dvs. på nivå de svakeste resultatene i seksjon 4.1. Tilsvarende resultater for BMS er 27.8 cm og 4.8 cm. For BM6040 er resultatene

atskillig bedre: 11.8 cm og 2.4 cm.

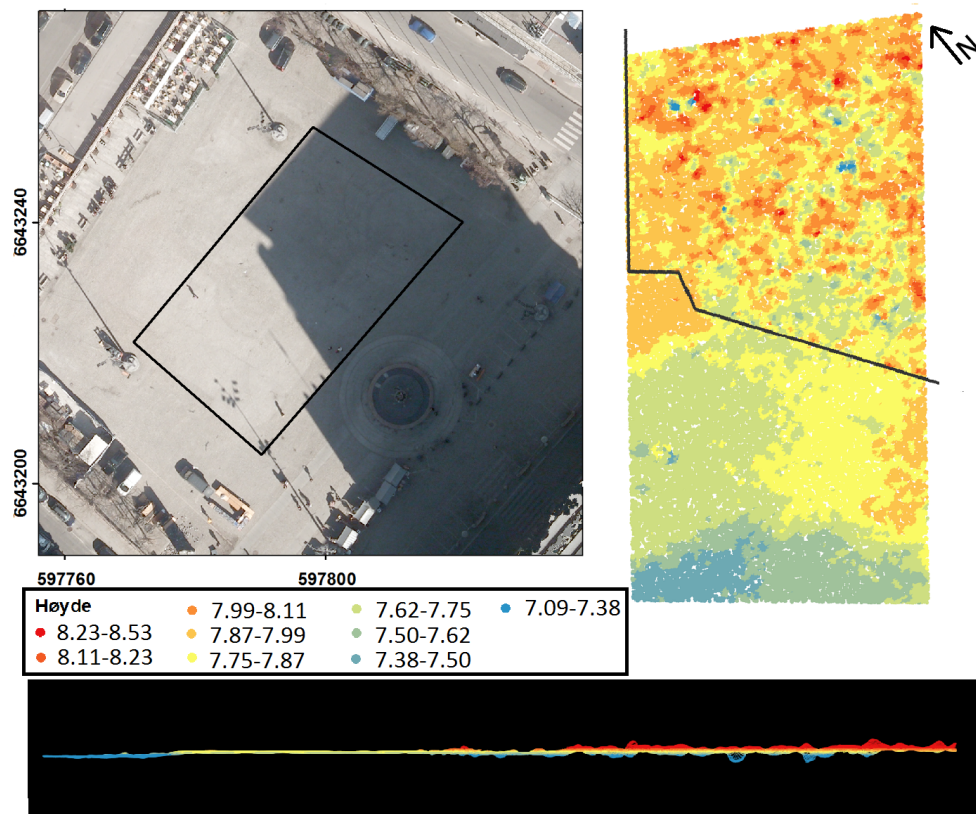


Figur 32: Marienlyst kunstgress. Venstre: punktsky BM. Midten: punktsky BMS. Høyre: punktsky BM6040. De to førstnevnte er nærmest identiske med punktsky M6 i seksjon 4.1 (sammenlikn med figur 22).

Resultatene i seksjon 4.4 viste at områder med lav tekstur/skygge avvek mer i høyde fra laserpunktskyene enn områder med god tekstur. At kvaliteten på matchingen av enkle overflater fungerer vesentlig dårligere i skyggepartier enn i opplyste områder, er eksemplifisert i figur 33. Visualiseringen av punktskyen OS viser at skyggepartiet⁹ inneholder mer støy i form av punkter som later til å være plassert et stykke over eller under bakken. Enkelte steder forekommer høydeforskjeller på ca. 1 m innen kort avstand. Området som befinner seg i sola er slett ikke støyfritt, men har færre umotiverte søkk og forhøyninger enn skyggepartiet. For å gi et kvantitativt inntrykk av forskjellene, kan det nevnes at for punktskyen OS var 95% RMSE fra 4971 bakkepunkter i laserpunktskyen lik 7.6 cm i området med sol, mens tilsvarende avvik i skyggepartiet var 11.7 cm. Tilpasning av et tredimensjonalt minste kvadraters regresjonsplan i to like store arealer (inneholdende ca. 80 000 punkter hver) i lys- og skyggepartiene på Youngstorget, ga 95% RMS-residualer på hhv. 5.9 og 9.6 cm. Punktskyen OS6040 ga noe bedre resultater: For denne var 95% RMSE relativt til laserpunktskyen for sol- og skyggepartiene hhv. 5.0 og 7.9 cm, mens plantilpasning ga 95% RMS-residualer på hhv. 3.6 og 6.1 cm for lys- og skyggepartiene.

Ved stikkprøver viser det seg, ikke overraskende, at velteksturerte overflater med god kontrast gir de jevneste, mest støyfrie overflatene i de undersøkte punktskyene. Et par eksempler er avbildet i figur 34. Tilpasning av tredimensjonale minste kvadraters regresjonsplan i arealer på drøyt 200 m² (som inneholder ca. 50 000

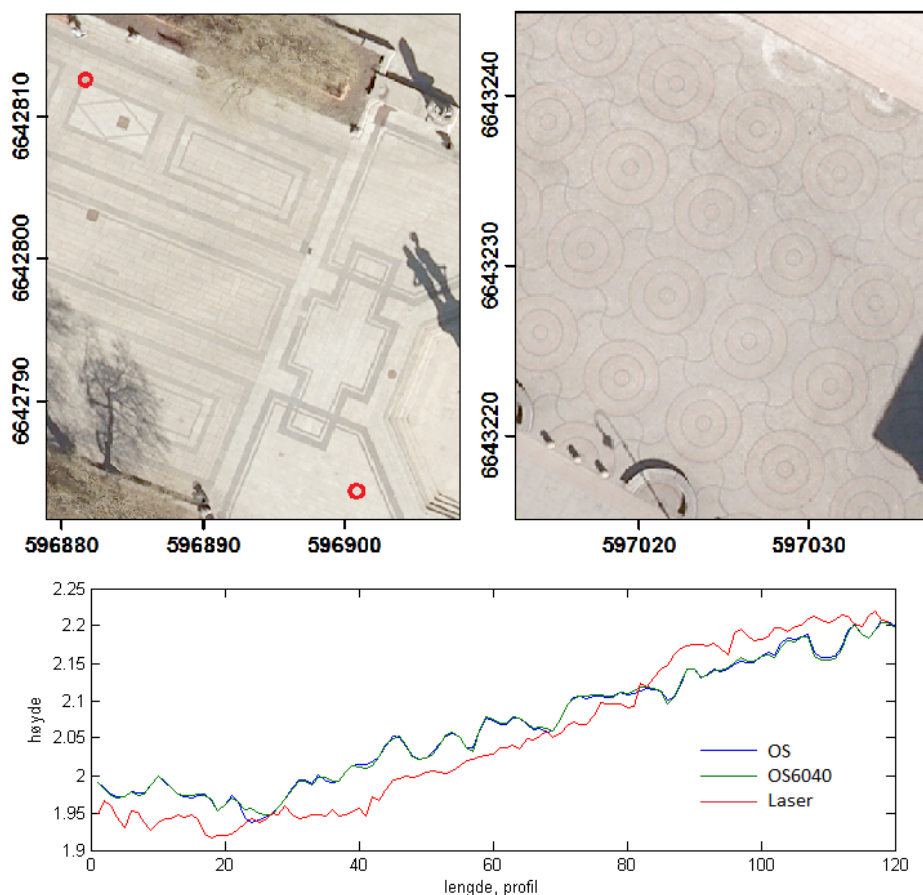
⁹Bildet i ortofotoet er 2.8.30, men skyggepartiet befinner seg på noenlunde samme sted i alle avbildninger av dette området.



Figur 33: Øverst til venstre: Ortofoto av Youngstorget, Oslo sentrum. Svart ramme viser arealet av punktskyen til høyre. Øverst til høyre: Punktskyen OS, der svart linje omtrentlig markerer skillet mellom sol (under) og skygge (over). Punktskyen er noe rotert, slik at skyggepartiet befinner seg øverst. Under: Punktskyen sett i 3D "fra siden"; skyggepartiet på høyre side.

punkter) kan i slike tilfeller gi 95% RMS-residualer på 1.8-2.0 cm, både for OS og OS6040. Dette er nesten på nivå med laserpunktskyen. Den jevne modelleringen av overflaten i OS og OS6040 er også illustrert gjennom profilet i figur 34. Slike gode resultater ser imidlertid ut til å kreve betingelser som opptrer nokså sjeldent i bildene.

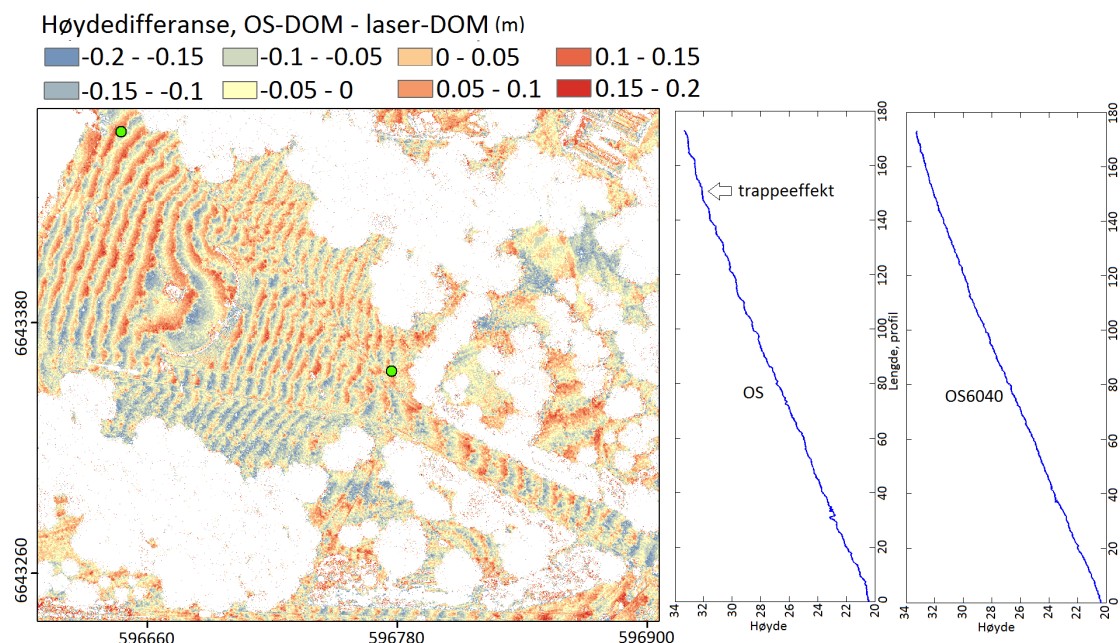
Ved nærmere betraktning av høydedifferansene mellom DOM'er fra matching og laserskanning, trer det frem noen påfallende mønstre i teksturfattige (asfalterte/gruslagte/gressbevokste), hellende overflater. Et eksempel er fra slottsplassen i Oslo, vist i figur 35, venstre side. Det forekommer undulasjoner i overflaten til DOM'en generert fra punktskyen OS, noe som gjør at denne er vekselvis høyere og lavere enn laser-DOM'en. Årsaken til denne typen trappeeffekter er vanligvis manglende bildetekstur, dvs. mangel på grunnlag for å utføre høydemålinger, noe som gjør at algoritmen i Match-T DSM "gjenbraker" forrige høydemåling (se forklaring fra Inphos supportavdeling i appendikset). Arealet mellom to høydemålinger blir dermed (nesten) flatt. Litt påfallende er det at nokså få av punktene på slotts-



Figur 34: To eksempler på overflater med god tekstur som gir gode matcherresultater. Øverst til venstre: Rådhusplassen, Oslo sentrum. Øverst til høyre: Universitetsplassen, Oslo sentrum. Under: Profil mellom de to punktene avbildet til venstre; OS og OS6040 gjengir overflaten nær like jevnt som laserpunktskyen. Profilet er tegnet langs DOM'er, konvertert fra de originale punktskyene, med 30 cm oppløsning, og inneholder 120 datapunkter.

plassen (ca. 1 %) er kategori 13- og 14-punkter (jf. seksjon 3.5), når det synes å fremgå av programdokumentasjonen at disse punktklassene nettopp skal markere punkter generert ved mangelfull matching. Det er verdt å merke seg at selv om disse artefaktene også forekommer i punktskyen OS6040, er resultatet her betydelig jevnere. Dette er illustrert ved to profillinjer tegnet langs overflatemodellene i figur 35, høyre side. Disse profillinjene har 1156 datapunkter, og ved sammenlikning av høydeverdiene med et tilsvarende profil for laserpunktskyen, har OS 95% RMSE lik 5.7 cm, mens OS6040 har 95% RMSE på 3.0 cm. Dette fenomenet går igjen i alle testområdene, men siden høyden på trinnene varierer med helningsgrad og størrelsen på baselinjen er det vanskelig å generalisere hvor store konsekvensene av dette er, mht. nøyaktighet.

I seksjon 4.1 ble det vist at små objekter, og særlig objekter i bevegelse (som mennesker på en fotballbane), kan forårsake støy i punktskyene. Ved produksjon av



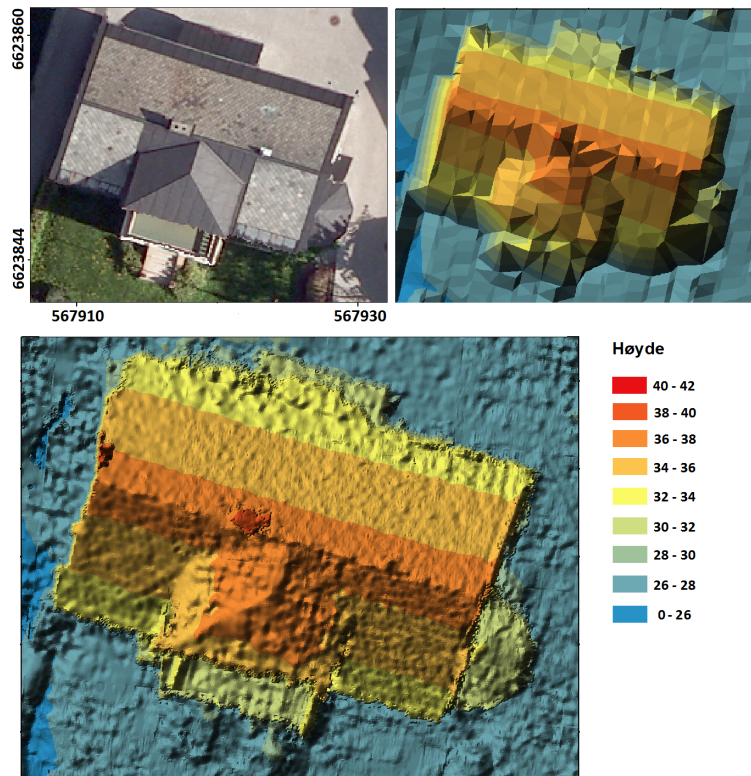
Figur 35: Trappeeffekt i teksturfattige, hellende overflater, slottsplassen i Oslo. For fotografisk oversikt over området, se nordvestre del av figur 19. Venstre side: Differanse i høyde mellom laser-DOM og DOM fra punktskyen OS. Avvik større enn 0.2 m (hovedsakelig trær) er fjernet. De resterende avvik på asfalt-, gress- og grusoverflatene er små, men varierende ettersom helningen ikke modelleres jevnt i OS-DOM'en. Grønne punkter markerer startpunkt (høyre punkt) og sluttunkt for profilgrafer. Høyre side: Profillinjer langs DOM'ene fra punktskyene OS og OS6040.

DOM-punktskyer med lite glatting bør man i utgangspunktet ta høyde for at alt som befinner seg i bildene – mennesker, dyr, trafikk, etc. – kan ”avsettes” i høydedataene, ikke sjelden som forsenkninger av typen som ble vist i figur 22. Høyere bildeoverlapp reduserer problemet med bevegelige objekter noe; f.eks. vil støyeffekter på en vei fra en bil i fart i et bilde utjevnes dersom det finnes flere bilder som bare viser veien. For et eksempel på at trafikk skaper støy i høydedataene, se figur 44 i seksjon 4.8.

4.6 Modellering av bygninger

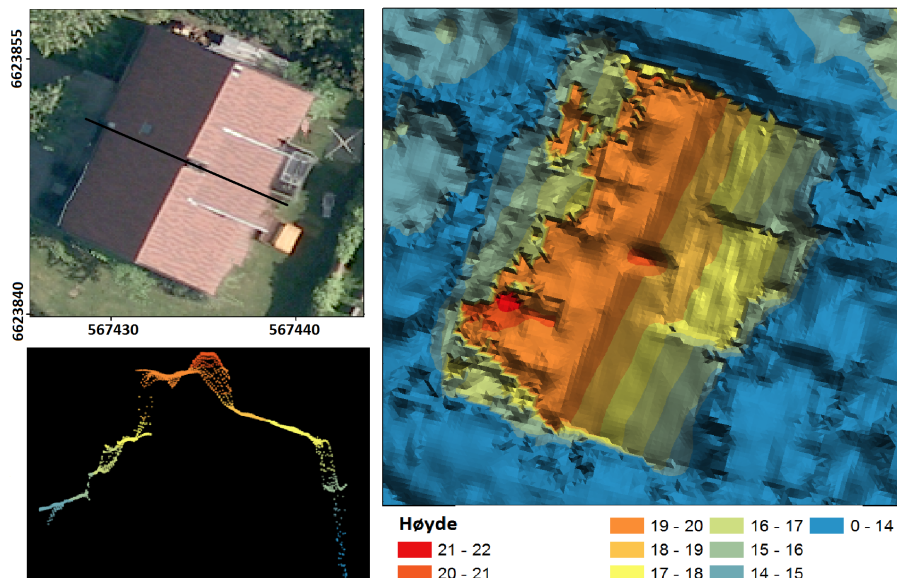
I denne seksjonen vil modellering av bygninger gjennomgås nærmere. Bygninger kan selvsagt bestå av relativt enkle overflater (som takflater). I det følgende vil også modelleringen av de mer komplekse detaljene ved bygninger bli undersøkt. Observasjonene som gjøres i denne seksjonen gjelder alle punktskyene som ble produsert med Match-T DSM, så her foretas ikke noen sammenlikning mellom disse. Eksempelene er hentet fra punktskyene DS og OS (ref. seksjon 4.2 og 4.3). Det er vanskelig å strukturere denne seksjonen på annet vis enn ved å kommentere et antall visuelle eksempler, og ettersom eksemplene viser mange av de samme trekkene, vil endel poenger måtte gjentas.

Figur 36 viser et privathus fra testområde Drammen sentrum. Figuren viser at den høye punkttettheten i en punktsky fra stereomatching – DS – gir en bedre gjengivelse av bygningen enn laserpunktskyen. I DS er bygningens omriss og detaljer tydeligere, mens den store avstanden mellom punktene i laserpunktskyen gir et mer utflyttende resultat. Takmønnet er rettere, skarpere og klarere definert i DS. Dessuten fremtrer detaljene på taket tydeligere i DS, og den lyse pipa (størrelse ca. $7 \cdot 5$ piksler) har en noenlunde korrekt form.



Figur 36: Øverst til venstre: ortofoto av privathus, Drammen sentrum. Øverst til høyre: Samme hus gjengitt i punktsky fra laserskanning. Nederst: Samme hus gjengitt i punktsky fra stereomatching (DS). Begge punktskyer har blitt visualisert ved triangulering mellom punktene og skyggelegging (*hillshade*) i ArcGIS.

Figur 36 er nærmest et ideelt eksempel på modellering av bygninger i Match-T DSM. Et annet eksempel er gjengitt i figur 37. Takflaten som er vendt mot solen gjengis godt, og pipa er synlig, om enn med noe avrundet form. Takmønnet er modellert som en nokså rett linje, antakelig pga. den tydelige overgangen mellom lys og skygge i bildet. Vestsiden av huset, som befinner seg i skyggen, minner svært lite om en takflate og har utslag som er flere meter både for høye og for lave. Taket synes å gro sammen med vegetasjonen på vestsiden av huset, slik at punktskyen aldri helt treffer bakken. Bemerkt også ”punktregnet” fra tak til bakke på høyre side av profilet, et problem som vil bli nærmere omtalt i neste eksempel.



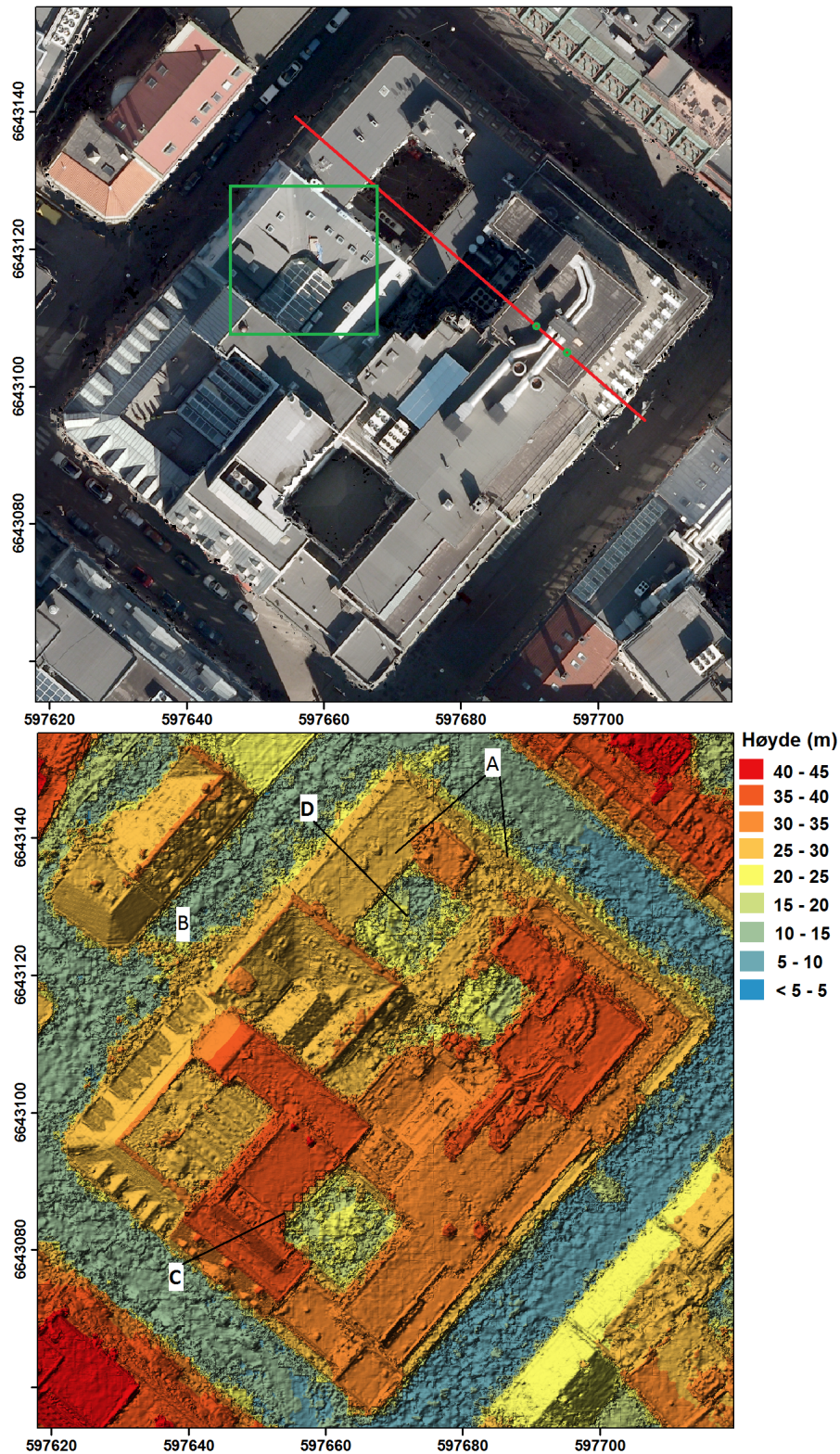
Figur 37: Øverst til venstre: ortofoto av privathus, Drammen sentrum. Svart linje markerer plassering for profil. Høyre: Samme hus gjengitt i punktsky DS, visualisert ved triangulering mellom punktene og skyggelegging. Nederst til venstre: Profil gjennom punktskyen DS.

Figur 38 viser en bygård i Oslo sentrum. Ytterligere et eksempel på forskjell i kvaliteten på modellering av flater i sol- og skygge er de to arealene markert med A i figuren; skyggeområdet er preget av mye støy. For brå høydesprang virker det å være av avgjørende betydning at bildeteksturen tillater matching både på toppen og bunnen av spranget (dvs. både på taket og på bakken nedenfor). Hvis ikke det er grunnlag for gode høydemålinger begge steder, plasseres det mange punkter mellom tak og bakke, antakelig vha. en form for interpolasjon, noe som gjør at høydespranget blir strukket ut. Et svakt eksempel er markert med B i figuren; andre eksempler er gjengitt i figur 39, som viser profilet som er markert i figur 38 gjengitt både i punktskyen OS og i laserpunktskyen. I laserpunktskyene forekommer også punkter plassert i høydesprangene, fordi mange laserpulser treffer bygningsvegger. Slike veggpunkter fra laserskanning er imidlertid plassert under hverandre, mens det i punktskyene fra Match-T DSM ikke finnes punkter med samme planimetricke koordinater; punktene mellom tak og bakken i OS representerer ikke veggen eller andre objekter på fasaden, men er snarere en utjevning av overflaten som gir mindre abrupte diskontinuiteter. Mengden punkter i klasse 13 og 14 (ref. seksjon 3.5) er forholdsvis høy for slike pseudo-veggpunkter, men definitivt ikke *for høy*¹⁰ ettersom mange "gode" punkter åpenbart har gale høydeverdier. Angående skarpe kanter (f.eks. takmøner), har det tidligere blitt påpekt at bildekontrast også har mye å

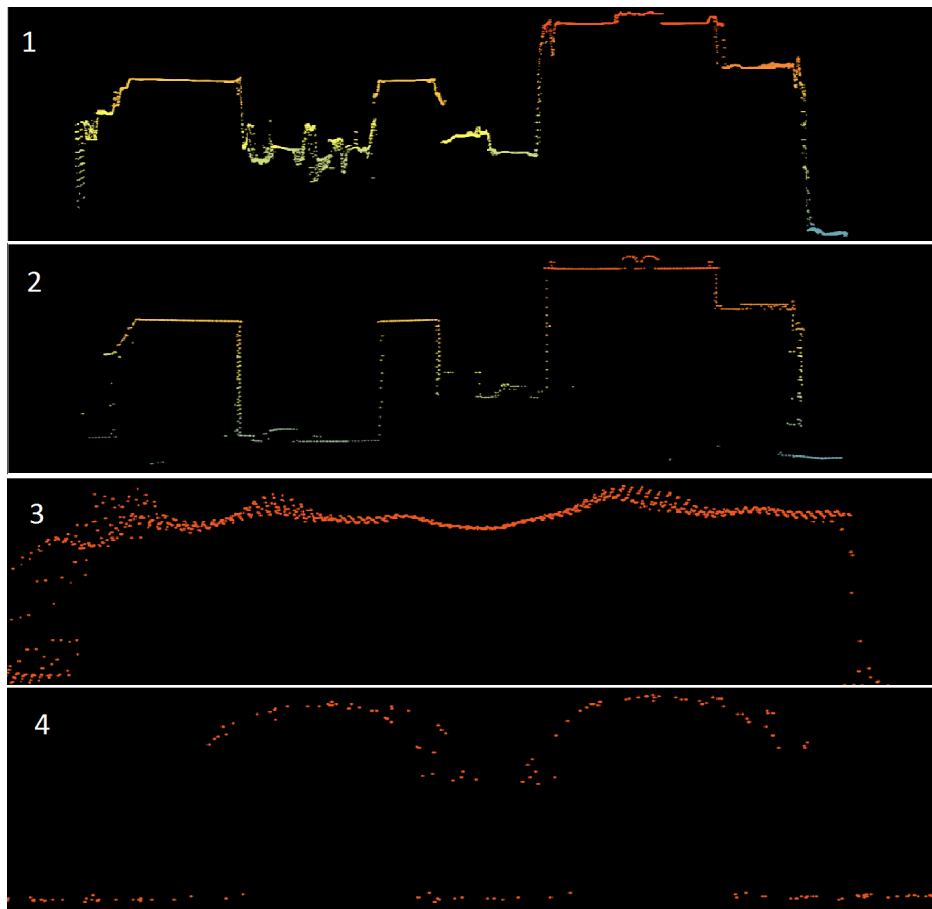
¹⁰Gitt at man antar at punkter markert som "gode" av Match-T virkelig skal oppfattes å ha relativt god høydenøyaktighet.

si for gjengivelse av dette. I tilfeller der det ikke finnes noen veldefinert kantlinje i periferien av taket, kan takkanter få en hakkete form (C i figur 38 er et spesielt svakt eksempel)¹¹. For øvrig vitner figur 39 om jevnere modellering av takflatene i laserpunktskyen. Videre er mørke bakgårder, f.eks. den som er markert med D i figur 38, og i tillegg gjengitt i figur 40(1), særlig problematiske; i eksempelet er det forskjeller mellom OS og laserpunktskyen på over 15 m enkelte steder. Slike urbane ”canyons” er relativt små mørke områder (der det er vanskelige å matche) omringet av høyereliggende overflater. Dette fører til at matchingen ikke lykkes i å gjengi den korrekte høyden for bakkeoverflaten. Videre er det åpenbart at kontrast mot omgivelsene og tekstur også er bestemmende for gjengivelsen av mindre detaljer som vinduer, piper, ventilasjonsanlegg, etc. Til tross for endel lavere punkttetthet har laserpunktskyen ofte bedre modellering av mindre objekter, noe som er illustrert i figur 39(3 og 4); de to ventilasjonskanalene på toppen av det høyeste taket har klart definerte former, mens de i OS har smeltet sammen til noe som ikke minner mye om de faktiske objektene. Sannsynligvis skyldes den utjevnede formen skyggeområder omkring ventilasjonskanalene. Et eksempel der matchingen fungerer bedre er vist i figur 40. Her svekkes resultatet i laserpunktskyen av at endel punkter har passert gjennom glass og enten har blitt reflektert fra en underliggende overflate eller ikke har returnert.

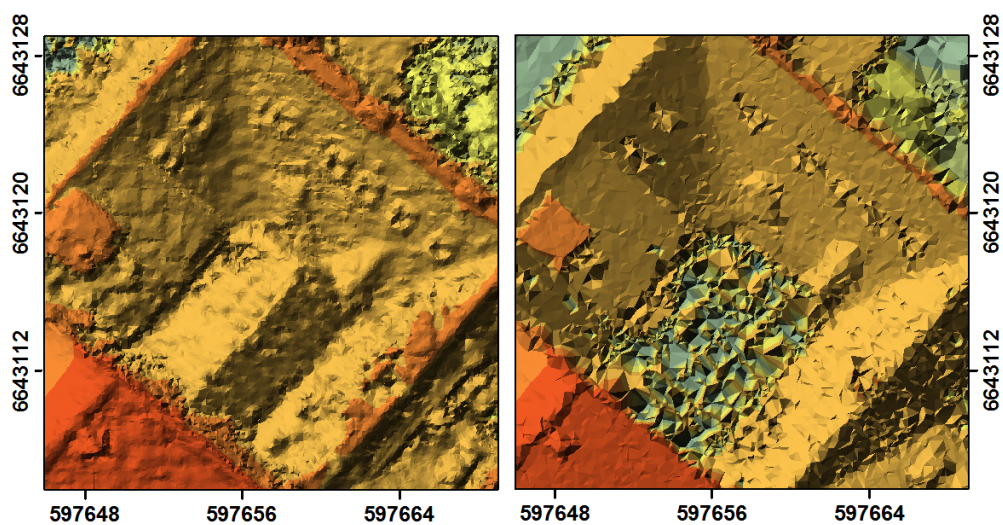
¹¹Takkanten er også hakkete i ortofotoet, som er produsert med OS som inndata, men er i virkeligheten rett.



Figur 38: Over: Ortofotomosaikk som viser bygård i Oslo sentrum. Profillinje gjengitt i figur 39 i rødt; grønne punkter på profillinjen markerer endene til detalj av profil, et tverrsnitt av to ventilasjonskanaler (gjengitt i figur 39). Grønt kvadrat viser detalj gjengitt i figur 40. Under: Gjengivelse av bygården i punktskyen OS. Punktskyen har blitt visualisert ved triangulering mellom punktene og skyggelegging (*hillshade*) i ArcGIS. Nærmere omtalte problemområder er markert med bokstaver.



Figur 39: Profiler av punktskyer som viser bygård i Oslo. (1) Profil av punktsky OS. (2) Profil av laserpunktsky. (3) Detalj av profil fra punktsky OS som viser tverrsnitt av ventilasjonsrør. (4) Detalj av profil fra laserpunktsky som viser tverrsnitt av ventilasjonsrør. Fargekodingen tilsvareer figur 38.

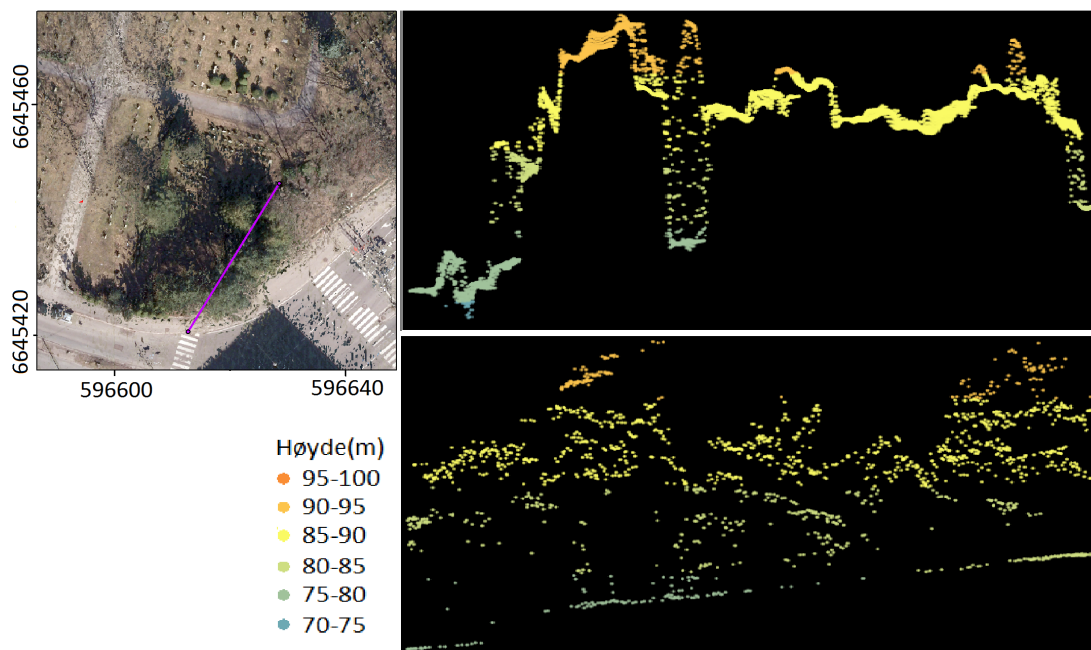


Figur 40: Detalj fra punktsky OS (venstre) og laserpunktsky (høyre). Fargekodingen tilsvareer figur 38.

4.7 Modellering av trær

På grunn av vegetasjonsendringer mellom datainnsamlingstidspunkt og fravær av andre gode referansedata består følgende seksjon bare av noen få bemerkninger angående gjengivelsen av trær i tett bildematching.

Det antakelig mest illustrerende og forsvarlige eksempelet på forskjellen mellom laserdata og data fra bildematching når det kommer til modellering av trær, er i dette tilfellet bartrær (der forskjellene som følge av ulike datainnsamlingstidspunkter antakelig er relativt små). Figur 41 viser et tverrsnitt gjennom en gruppe bartrær i punktskyen BM (ref. seksjon 4.3) og laserpunktskyen som dekker Oslo. Toppen av trekronene har noenlunde lik høyde, men laseren har en langt høyere evne til å trenge gjennom trekronen. Svært få av punktene i BM treffer bakken. Punktskyen fra bildematching har også et mer utjevnet preg, mens laseren nok gjengir "tilfeldighetene" i vegetasjonen bedre.



Figur 41: Tremodellering: Til venstre: fargelagt punktsky med profil markert; det nederste punktet tilsvarer venstre side i profilene. Høyre side: Profil gjennom punktskyen BM (over) og laserpunktsky (under).

For tynn vegetasjon, og når mengden blader på trærne er lav, gjengis ikke toppen av trekronen. Match-T DSM virker ikke å være i stand til å konsekvent matche grener, hvilket gjør at det som står igjen i punktskyen er punkthauger, eller til og med forsenkninger, som verken gir riktig høyde for trekronen eller bakken under treet (for et eksempel på dette, se figur 43 i seksjon 4.8).

4.8 Fremstilling av sanne ortofoto

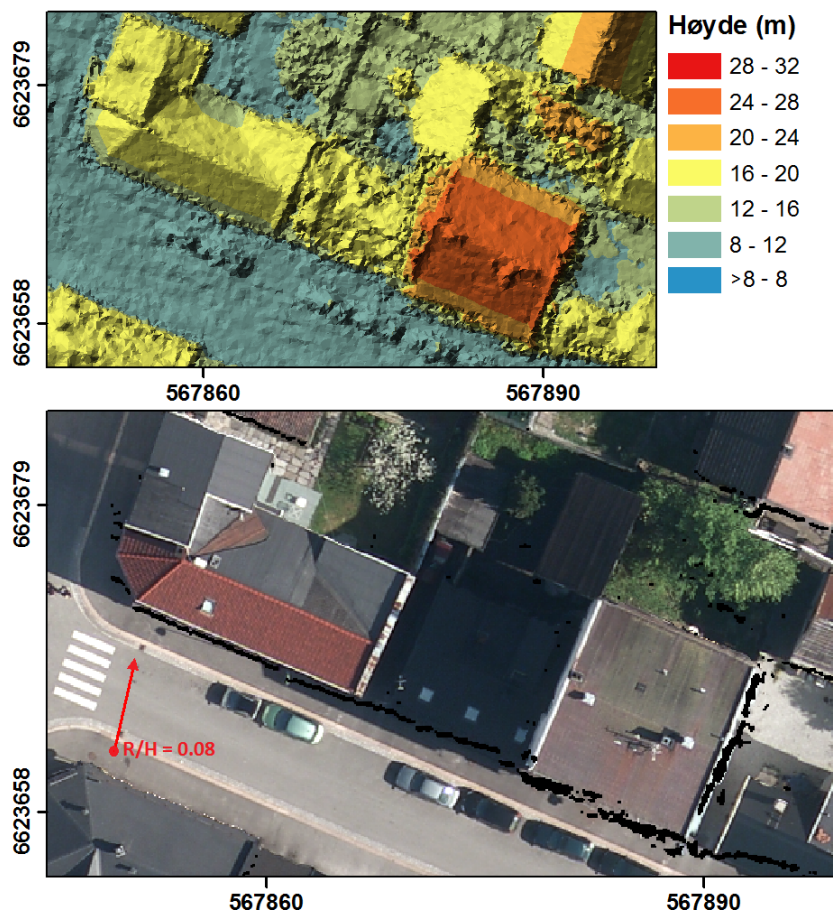
I denne seksjonen genereres sanne ortofoto med høydedata fra tett bildematching, og det undersøkes hvorvidt disse har visuelle forstyrrelser/feil. Det blir gjort observasjoner av hvordan bygninger, trær og ”andre overflater” fremstår i de sanne ortofotoene, og feil i ortofotoene blir knyttet opp mot feil i høydedataene.

De anvendte flybildene og de produserte punktskyene fra bildematching ble benyttet som inndata i ortofotoprogrammet OrthoMaster fra Inpho GmbH. Punktskyene som ble benyttet var DS, BM og OS (ref. seksjon 4.2 og 4.3). Disse måtte konverteres til hybridformatet SCOP for å kunne benyttes av OrthoMaster. Grid-oppløsningen i SCOP-modellene ble satt til 7 cm. Oppløsning for ortofotoene ble satt til 8 cm.

Ved inspeksjon av de produserte sanne ortofotoene fremgår det at kvaliteten innenfor det enkelte ortofoto varierer. Dette har tydelig sammenheng med (bl.a.) objektets avstand til terrengnadir i ortofotoene (ref formel 14). I det følgende vil radiell avstand (R) delt på flyhøyden (H) benyttes for forsøksvis generalisering av hvor stor del av ortofotoene som har akseptabel kvalitet.¹² I tillegg vil R/H benyttes i figurer for å angi de visualiserte områdenes avstand til nadir.

Det første temaet som skal tas opp er hvordan bygninger gjengis i sanne ortofoto basert på høydedata fra bildematching. Det fremgår av ortofotoene at mengden visuelle problemer kan variere endel mellom nokså like bygninger som befinner seg i noenlunde samme avstand fra terrengnadir. Dette er åpenbart relatert til ulik kvalitet på modelleringen av bygninger, som vist i seksjon 4.6. Det forekommer mange tydelig fortegnede takkanter i ortofotoene, forårsaket av at disse ikke er rette i høydedataene. Ofte plasserer ortofotoprogrammet okklusjoner på feil sted som følge av at høydesprang (fra tak og bakke) er utflytende og inneholder punkter med lav kvalitet. Dersom takkantene er rette og spranget mellom tak og bakke er skarpt i høydedataene kan bolighus i beste fall være relativt ufordreide ved ca. $R/H = 0.1$. Dersom avstanden til nadirpunktet er større enn dette, forekommer tydelige visuelle feil på selv godt modellerte hus. Det synes å være en generell regel at jo høyere en bygning er, desto tydeligere er de visuelle problemene i bygningsperiferien. Små detaljer på hustak – piper, vinduer, etc. – gjengis imidlertid hovedsakelig uten visuelle feil i ortofotoene. Høye, smale objekter, som f.eks. antenner, har en tendens til å bli noe fortegnet, noe som antakelig henger sammen med at de sjelden er gjengitt i høydedataene.

¹²Et par talleksemples, gitt flyhøyde 1150 m: $R/H = 0.2$ vil si et punkt som befinner seg 230 meter fra nadir. Dersom et ortofoto generelt er feilfritt ved denne avstanden, er høydedataene mer nøyaktige enn hvis visuelle feil generelt blir synlige ved $R/H = 0.02$, dvs. 23 m fra nadir.



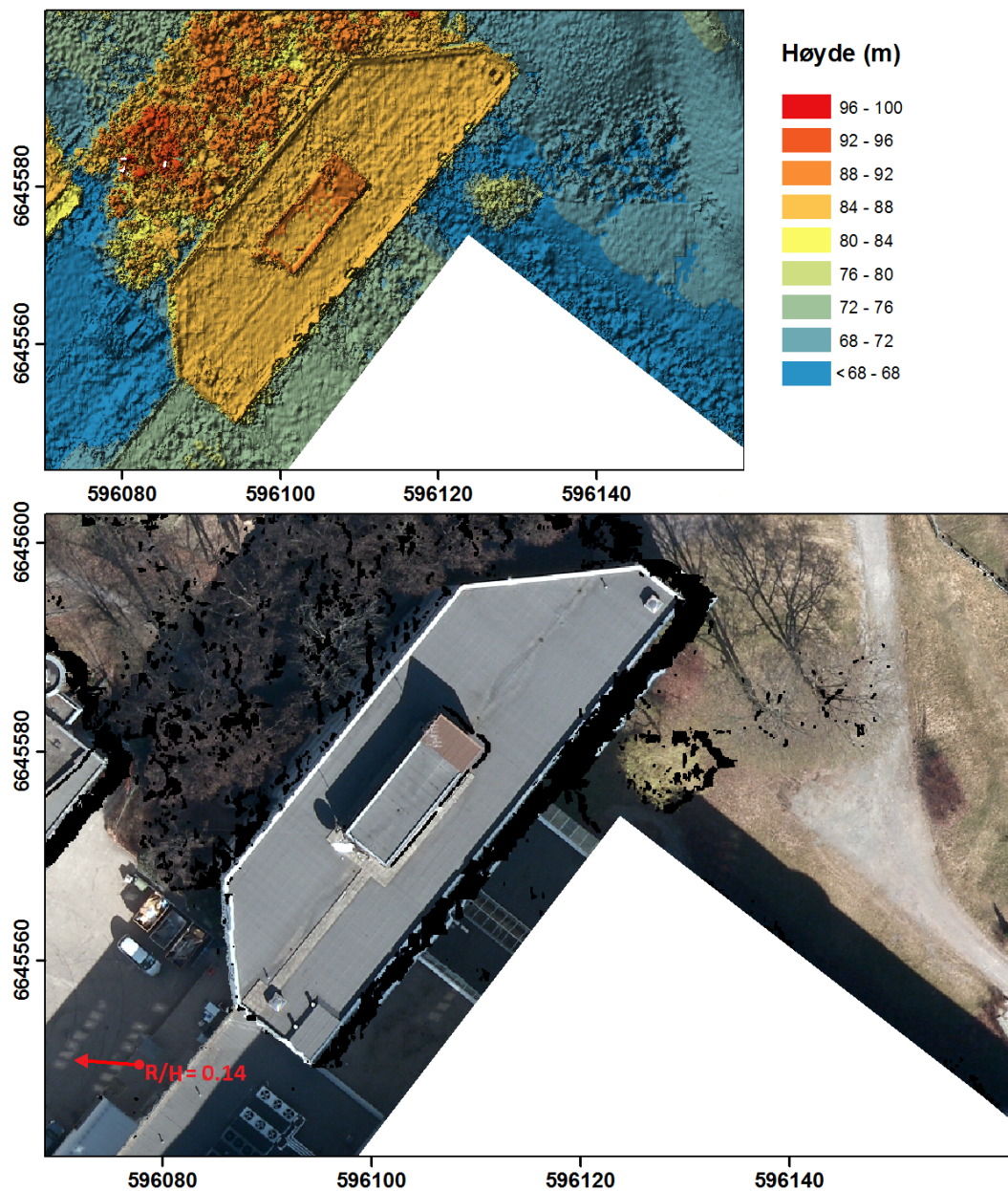
Figur 42: Punktsky og sant ortofoto fra Drammen sentrum. Pilen nede til venstre angir retning og avstand til nadirpunktet. Huset øverst til venstre er relativt godt gjengitt, og okklusjonen er plassert noenlunde riktig. Husene til høyre har skjevare takkanter og svakt definerte sprang mellom tak og bakke i høydedataene, noe som fører til forvrenginger og galt plasserte okklusjoner.

Gjengivelse av trær i sanne ortofoto later til å være spesielt problematisk. Trær er stort sett fri for visuelle feil bare innenfor ca. $R/H = 0.05$. Utenfor dette området er trær gjennomgående gjengitt i ortofotoene med fordreininger og små og feilaktige okklusjoner. Som nevnt i seksjon 4.7 har bladløse trær en tendens til å bli gjengitt som støyhauger eller groper med åpenbart feilaktig høyde, noe som medfører særlig påfallende feil i de sanne ortofotoene. Trær har videre en tendens til å "ødelegge" objekter som befinner seg i nærheten, som takkanter, veikanter, veimerkning, biler, etc – et eksempel er gjengitt i 43.

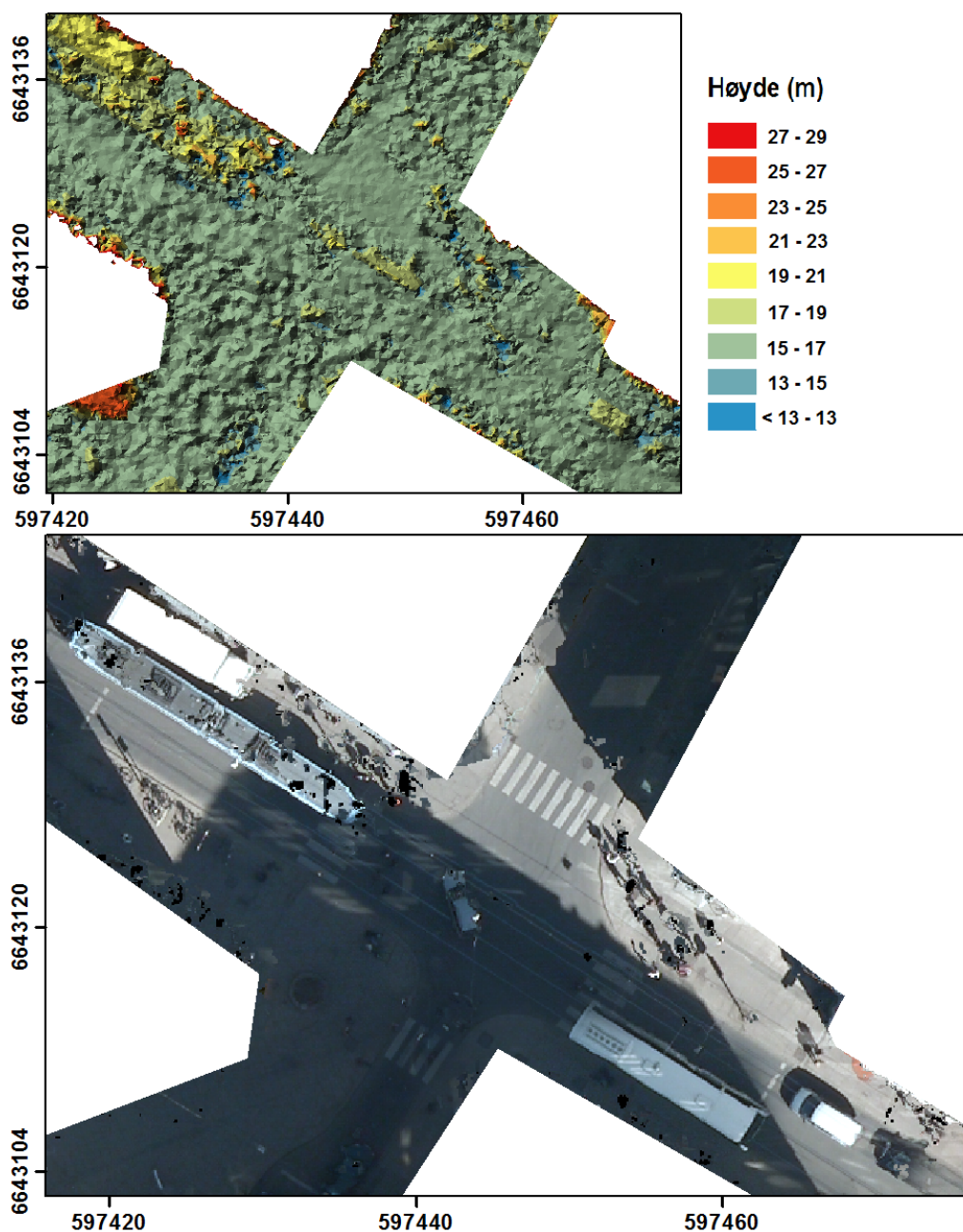
De fleste visuelle problemene i ortofotoene forekommer der overflaten er kompleks, dvs. der brå høydesprang forekommer hyppig. Langt på vei er ortorektifiseringen av jevnere, "enklere" overflater – veier, åpne arealer, grøntområder og lav vegetasjon, etc. – visuelt uproblematisk. Støykilder er dog tydelige i ortofotoene mange steder; særlig i Oslo sentrum fører mye trafikk og fotgjengere til mange fortegnede

objekter (se figur 44). I tillegg er trafikkerte områder spesielt utsatt for feilaktige okklusjoner, noe som ser ut til å skyldes at objekter i bevegelse skaper støygroper eller støyhauger i høydedataene. Dermed antar ortofotoprogrammet feilaktig at det ikke finnes bildemateriale som dekker gropene eller ”baksiden” av haugene. Falske okklusjoner har også en tendens til å forplante seg fra enkeltortofoto til ortomosaikk; i figur 44 finnes noen eksempler.

Dersom man ønsker å sette sammen de enkelte ortofotoene til en mosaikk er det selvsagt ikke nødvendig at ortofotoene er fullkomne, ettersom bare de delene som er nærmest nadirpunktet benyttes. Med 60/60-overlappen som ble benyttet i Drammen vil grensene mellom de enkelte ortofotoene generelt gå ved maksimum $R/H = 0.2$ i den indre delen av dekningsområdet. Med den tettere men litt irregulære bildeoverlappen i Oslo vil grensene mellom de enkelte ortofotoene generelt gå ved maksimum $R/H = 0.15$ i den indre delen av dekningsområdet. Ettersom feil på bygninger forekommer atskillig nærmere nadirpunktet enn dette, følger det at ortofotomosaikken vil inneholde mye feil. I tillegg vil det være nødvendig å fylle okklusjoner med bildeinformasjon med lang ”nadirdistanse”; i slike tilfeller vil feil i høydemodellen fremtre tydeligere ved at pikslene som fylles inn ikke stemmer overens med omgivelsene. Samlet fører dette til at det er få hus som modelleres uten visuelle forstyrrelser i alle de undersøkte områdene. Relativt feilfrie ortomosaikker kan oppnås langs midten av flystripene i Oslo som er flydd med 80% overlapp – der R/H maksimalt er ca. 0.07 – men dette forutsetter små bygninger og lite vegetasjon og annen støy.



Figur 43: Punktsky og sant ortofoto fra testfelt Blindern-Majorstuen. Pilen nede til venstre angir retning og avstand til nadirpunktet. Vegetasjonen på nordvestre del av bygningen er ikke korrekt modellert, noe som gir feilaktige okklusjoner. Vegetasjonen forstyrrer også modelleringen av bygningen; takkanten blir forvrenget og deler av veggene er fremdeles synlige. De bladløse trærne på høyre side er gjengitt som hauger og groper, og blir fortegnet i ortofotoet. Merk også at takkanten på østsiden av bygget ikke er rettlinjet i punktskyen, noe som skaper store forstyrrelser i ortofotoet.



Figur 44: Punktsky og sann ortofotomosaikk som viser krysset mellom Akersgata og Grensen i testfelt Oslo sentrum. Trafikk og annen bevegelse skaper støy i høydedataene som forplanter seg til ortofoto og ortofotomosaikk. I tillegg til at kjøretøy, mennesker, etc., fortegnes, finnes det falske okklusjoner der ortofotoprogramvaren "tror" at det ikke er innsyn.

5 Oppsummering og diskusjon

5.1 Oppsummering og diskusjon av resultater

5.1.1 Punkttetthet og fullstendighet

Hurtig og automatisert produksjon av store mengder digitale høydedata blir gjerne trukket fram som en særlig fordelaktig egenskap ved tett bildematching (f.eks. Leberl et al. 2010). Undersøkelsene i denne oppgaven har vist at punktskyer med tetthet omtrent tilsvarende GSD kan produseres med hastighet på ca. 30 000-55 000 punkt per sekund (tabell 4, 6, 8).

Det har blitt vist sammenheng mellom bildeoverlapp og fullstendighet. Økt overlapp gir bedre innsyn, noe som igjen reduserer mengden hull i datadekningen. Sammenlikn f.eks. fullstendigheten i punktskyen DS (60/60-overlapp) med punktskyen DS6020 (60/20-overlapp) (seksjon 4.2.1), eller punktskyene produsert i Oslo-testfeltene med overlapp på 80/40 (eller høyere) med punktskyene produsert med 60/40-overlapp (seksjon 4.2.2). Imidlertid er resultatene mht. mengden produserte punkter litt mindre entydige dersom økning av bilder som avbilder de samme objektene også innebærer mer matching mellom bilder tatt med et visst tidsintervall. Det ble vist i seksjon 4.1 at hull i datadekningen kan forekomme ved matching av bilder fra ulike striper fotografert samme dag, f. eks. pga. skygger som beveger seg. Likevel tyder høyere punktmengde i f.eks. DS enn DSS (tabell 4) på at matching mellom striper fotografert samme dag kan gi en viss gevinst ved at dødinkel reduseres. Derimot synes matching mellom nabostriper fotografert med flere dagers mellomrom å kunne gi svakere resultater – mengden punkter var f.eks. lavere i punktskyen M6 enn i M5 (tabell 2), og lavere i OS enn i OSS8040 (tabell 6).

Ut fra resultatene i seksjon 4.2 kan det trekkes noen lærdommer – med pretensjoner om en viss nytteverdi – angående hvor høy bildeoverlapp som er nødvendig for å generere høydedata mer eller mindre uten hull over norske bymiljøer. I seksjon 4.2.1 ble det vist at høydedata med relativt få hull kunne produseres over Drammen sentrum fra bilder med bildeoverlapp på 60/20. 60/60-overlapp ga en punktsky nærmest uten hull (bortsett fra over vannoverflate). Når det gjelder Oslo sentrum ble det vist i seksjon 4.2.2 at dødinkel kan resultere i endel hull i datadekningen ved overlapp på 60/40. Benyttelse av bilder med overlapp på 80/40 resulterte i høydedata med bare meget små hull i det samme området, selv om stripetvang ble benyttet. Ettersom 80/40-overlapp gir høydedata nærmest uten hull i de undersøkte områdene må det antas at enda høyere overlapp vil kunne gi høydedata med god fullstendighet i enda mer problematiske områder (noe som imidlertid trolig er sjeldent i Norge).

Observasjoner av høy punkttetthet og fravær av hull i høydedata produsert med Match-T DSM bør nok ledsages av spørsmål om hvilke prosesser som har generert punktene. Særlig når man genererer høydedata der avstanden mellom punktene omtrent tilsvarer GSD, bør man være oppmerksom på at hvert punkt i utdataene kanskje ikke er et resultat av en parallaksemåling. Det ble i seksjon 4.5 påvist trappeeffekter/undulasjoner som antakelig viser at endel punkter har ”arvet” høydeverdiene til andre punkter. Plasseringen av punkter som åpenbart har feilaktig høyde i høydesprang synes å tyde på at overflaten kan være interpolert snarere enn målt. Selv over nærmest monokrome vannoverflater produseres stedvis store mengder punkter. I undersøkelsene i denne oppgaven har det ikke vært mulig å avdekke hvor omfattende denne eventuelle¹³ ”innfyllingen” av punkter er, men forekomsten av punkter i områder der matching er vanskelig bør antakelig behandles med en viss skepsis (selv om punktene er klassifisert som ”gode” av programvaren).

5.1.2 Punktenes kvalitet

Undersøkelsene av absolutt høydenøyaktighet (seksjon 4.3) viste standardavvik og RMSE på 10-12 cm for de tre undersøkte punktskyene. Dette er omtrent 1.5-1.8 ganger GSD¹⁴ (som i dette tilfellet var ca. 6.5 cm). Hvis man overser faktorene som tilsier at resultatene ikke er sammenliknbare¹⁵, er dette noe svakere resultater enn de fleste undersøkelsene referert i seksjon 2.4, men innenfor noenlunde samme størrelsesorden. Betraktelig lavere standardavvik og RMSE er innenfor rammene av 95% konfidensintervallene.

Det at dataene som ble undersøkt er ”rå” og kan inneholde grove feil er argument for å benytte seg av trimmede statistikker ved angivelse av nøyaktighet. Når de 5% av kontrollpunktene med størst avvik ble ignorert, resulterte dette i RMSE på 6.8-8 cm. Estimaten for høydenøyaktighet målt i 95% RMSE oversteg ikke 12.6 cm på 5% nivå for de undersøkte punktskyene.

Undersøkelser av relativ høydenøyaktighet mot punktskyer fra laserskanning (seksjon 4.4) viste små høydeavvik over grøntområder uten vegetasjon og over veier og andre asfalterte overflater som ikke befant seg i skygge. Typisk 95% RMSE var 4-9 cm. Undersøkelsen viser at høydenøyaktighet for data fra tett bildematching nok kan være noe bedre enn hva som ble funnet i den absolutte nøyaktighetskontrollen, dersom man unngår skyggepartier i bildene. Til tross for at etablering av gode

¹³Det er naturligvis vanskelig å bevise at hvert punkt ikke er et produkt av en parallaksemåling uten dybdekunnskap om matchealgoritmen.

¹⁴Avvik målt i GSD benyttes ofte i denne typen undersøkelser, for å generalisere resultatet.

¹⁵f.eks. ulik overlapp/GSD/filtrering av resultater, samt potensielt usammenliknbare kontrollpunkter

testområder¹⁶ er mer problematisk for takflater, ble det også vist flere eksempler på lave avvik over skrå takflater med god bildetekstur.

Gjentatte ganger har det blitt vist at kvaliteten på matchingen svekkes i mørke kontrast- og teksturfattige områder i bildene (skyggeområder). Det er mulig at enkelte av resultatene for høydeavvik i skyggepartier i tabell 13 og 15 er noe pessimistiske, ettersom det var vanskelig å garantere at testområdene var gode. En påstand om at avvikene målt i 95% RMSE øker med en faktor på 1.5-2.5 fra sol- til skyggepartier synes ikke urimelig. Videre ble det i seksjon 4.5 og 4.6 vist at støy/grove feil forekommer hyppig i skyggepartier. Skygge i bildene gir artefakter som punkthauger og -forsenkninger over jevne overflater, og svekker modelleringen av små detaljer, kanter og høydesprang.

Funnene i denne oppgaven tyder på at Match-T DSM ikke er i stand til å behandle høy overlapp på en (teoretisk) optimal måte med tanke på kvaliteten til de produserte punktene. Benyttelse av stripetvang har gitt høydedata med omtrent like god høydenøyaktighet som matching både langs og mellom stripene (ref. spesielt seksjon 4.3 og 4.4). Det at matching både langs stripene *og* mellom stripene ikke gir tydelig bedre resultater kan betraktes som indikasjon på at optimal multippel stereomatching (der fordelene ved høy bildeoverlapp utnyttes fullt ut) ikke er realisert i Match-T DSM¹⁷. Matching mellom striper later imidlertid til å være et generelt problem for bildematching, ikke bare for Match-T DSM, bl.a. pga. skygger som beveger seg (Haala 2009), (Ok et al. 2011). Mer overraskende er det at kvaliteten på punktene kan svekkes selv om antall bilder som inngår i matchingen økes. Dette fremgår både av seksjon 4.1, 4.3 og 4.4, der et utvalg av bilder i flere tilfeller ga punkter med bedre kvalitet enn fulle bilde sett. Dette kan relateres til den gjennomsnittlige lengden på baselinjen, som øker når bildeoverlappen reduseres. Ikke desto mindre er dette bemerkelsesverdig, fordi informasjonsmengden øker med antallet bilder som inngår i matchingen. Marienlyst kunstgress ble gjengitt mer eller mindre likt i punkt skyer basert på både et fåtall og mange bilder. M1 og M4 (figur 22) er nærmest identiske, noe M6, BM og BMS også er (figur 22 og 32). Dette tyder på at Match-T DSM prioriterer å produsere mange punkter på kort tid ved å matche bilder som har kortest mulig innbyrdes avstand i tillegg til kortest mulig avstand til objektet som matches. Dermed realiseres ikke potensialet som ligger i å benytte mange ulike bildekombinasjoner. At økt antall bilder i matchingen i noen tilfeller så ut til å produserte data med høyere vertikal nøyaktighet (se f.eks. tabell 15 i seksjon

¹⁶Dvs. testområder der man er sikker på at man faktisk undersøker den overflatetypen man ønsker å undersøke.

¹⁷Dette er selvsagt ikke overraskende, all den tid stripetvang anbefales i programdokumentasjonen

4.4) forstyrrer ikke inntrykket av at meget høy bildeoverlapp kan utnyttes bedre enn hva som er tilfelle i Match-T DSM. Resultatene i seksjon 4.1 viste fordeler både ved matching av bilder med kort og lang baselinje, og utvelgelse av det ”beste” bildeparet i enhver situasjon er antakelig vanskelig å automatisere. Dersom bedre utnyttelse av høy overlapp er praktisk gjennomførbart, kan nok lavere effektivitet aksepteres i mange sammenhenger dersom det resulterer i høyere nøyaktighet. Leberl et al. (2010) etterlyste mer forskning på området etter å ha gjort liknende observasjoner av en (ikke nærmere angitt) matcheprogramvares ”failure to take advantage of all [...] images available in the matching process” (Leberl et al. 2010, s. 1128).

5.1.3 Tett bildematching versus laserskanning

I Leberl et al. (2010) ble fraværet av hull i høydedataene som følge av godt innsyn (gitt høy bildeoverlapp) trukket frem som en fordel ved bildematching i forhold til laserskanning. Undersøkelsene i denne oppgaven har ikke vært grundige nok til å trekke noen konklusjon angående dette, men i seksjon 4.2 ble det observert færre hull i høydedata fra tett bildematching med 80/40-overlapp og stripetvang enn i en laserpunktsky med relativt høy punkttetthet (figur 27 og 29).

Flere steder i litteraturen, bl.a. i Leberl et al. (2010) og Hirschmüller & Bucher (2010), trekkes den høyere punkttettheten frem som et argument til fordel for tett bildematching. I denne oppgaven har det blitt vist eksempler på at punktskyer fra bildematching kan overgå laserskanning mht. gjengivelse av brå høydesprang, skarpe kanter og små detaljer, på grunn av overlegen punkttetthet (ref. f.eks. figur 36). Det kan innvendes at konkurranseevnen til høydedata fra laserskanning på dette området øker med punkttettheten, men et praktisk orientert motargument er at økning av punkttettheten i laserskanning vil være nært forbundet med økt bruk av ressurser til datainnsamling.

Det er viktig å påpeke at ettersom laserskanning ikke har vært tema for denne undersøkelsen, er det en viss fare for at svakhetene ved denne teknologien er noe underkommunisert. I tillegg er laserpunktskyene som har blitt benyttet i denne undersøkelsen produkter som har blitt kvalitetskontrollert og bearbeidet før leveranse. I rå laserpunktskyer forekommer også støy og uønskede objekter som må finnes og behandles før dataene kan anvendes.

I undersøkelsen av absolutt høydenøyaktighet i seksjon 4.3 ga en laserpunktsky de beste resultatene. Høydeavvikene for punktskyene fra bildematching, målt i 95% RMSE, var i beste fall dobbelt så store som avvikene for laserpunktskyen. Undersøkelsen ga imidlertid ikke grunnlag for å hevde at estimatene for høydenøyaktigheten til laserpunktskyen var signifikant bedre på et 5% nivå. Ob-

servasjonene som tyder på bedre høydenøyaktighet for laserskanning stemmer imidlertid overens med konklusjonene i de fleste liknende undersøkelser (Hirschmüller & Bucher (2010) er den eneste undersøkelsen kjent for undertegnede som har hevdet noe annet, men denne undersøkelsen benyttet seg bl.a. ikke av datatrimming, inneholdt ikke konfidensintervaller og var basert på enda færre kontrollpunkter enn herværende undersøkelse).

Resultatene i denne oppgaven synes videre å støtte konklusjonen i Haala (2009) angående den høyere mengden feil i data fra bildematching. Selv om laserskanning av visse overflatetyper er problematisk, later det ikke til å forekomme noen tilsvarende konsekvent og omfattende produksjon av svake punkter som i bildematching. Bildematching kan nok gi høydedata med tilnærmet like lite støy som laserskanning, men dette ser ut til å gjelde bare for overflater som er ideelle for matching (figur 34).

Det bør nevnes at en påstand om høyere kvalitet på punktene fra laserskanning krever at den planimetriske nøyaktigheten til de to teknologiene tas med i vurderingen. Dette har ikke blitt undersøkt i denne oppgaven. Det synes å være en enighet i fagmiljøet om at orienteringen av dataene i plan er mer nøyaktig for fotogrammetriske data (jf. Leberl et al. (2010), Gehrke et al. (2010)), så grunnlaget for at den planimetriske nøyaktigheten til data fra bildematching kan være bedre later i alle fall til å være til stede.

5.1.4 Egnethet i produksjon av sanne ortofoto

Undersøkelsene i seksjon 4.8 tydet på at produksjon av sanne ortofoto med høydedata fra tett bildematching er problematisk. Stedvis svak gjengivelse av takkanter og brå høydesprang gjør at visuelle feil blir tydelige nokså nær ortofotoenes nadirpunkt. Vegetasjon later til å være enda mer problematisk for ortofotoenes visuelle kvalitet. Støy i høydemodellen som stammer fra trafikk og andre mindre objekter kan også medføre feil i ortofotoene. I ortomosaikker benyttes naturligvis bare sentrum av ortofotoene, men selv med bildeoverlapp på 80% produseres mosaikker med mange tydelige visuelle feil dersom overflaten ikke er relativt enkel. Ytterligere økning av overlappen vil selvsagt redusere antall feil i en ortomosaikk, men påstanden i Wiechert & Gruber (2010) om at automatisert produksjon av sanne ortofoto med høydedata fra tett bildematching er mulig, bekreftes ikke av funnene i denne oppgaven. Imidlertid kan det slett ikke avkreftes at disse høydedataene kan inngå som en *bestanddel* i en DOM som kan anvendes i produksjon av sanne ortofoto med god kvalitet, ved at dataene suppleres med f.eks. vektordata. Det at bilder og høydedata har samme orientering og inneholder de samme objektene, samt den høye

punkttettheten, er i alle fall teoretiske argumenter til fordel for å benytte seg av data fra tett bildematching i produksjon av sanne ortofoto.

5.2 Generelle betraktninger om høydedata fra tett bildematching

På grunn av nødvendigheten av avgrensning har mulighetene som ligger i tett bildematching langt ifra blitt fullstendig undersøkt i denne oppgaven. Det kan antas at tett bildematching er mer velegnet for andre overflater enn de urbane områdene som har blitt undersøkt her, f.eks. fjellterreng. Undersøkelsene av modellering av trær i denne oppgaven er selvsagt ikke tilstrekkelig til å konkludere angående anvendeligheten av teknologien i skogsområder (For grundigere undersøkelser av skogmodellering med tett bildematching se f.eks. Baltsavias et al. (2008) og Breidenbach & Astrup (2011))

Det må også antas at det ligger mange muligheter i valg av parametre i matcheprosessen. Eksempelvis kan det antas at mer glatting (*smoothing*) vil kunne gjøre endel for å redusere mengden støy på trafikkerte veier. Dette vil dog antakelig jevne ut mindre detaljer man ønsker å beholde. Det er imidlertid mulig å benytte ulike parametersett for ulike overflater, for deretter å kombinere de ulike resultatene – selv om dette naturligvis gjør prosessen mindre automatisk.

Videre bør nok utdataene fra tett bildematching betraktes som en form for rådata, som må gjennomgå ulike former for behandling før de kan anvendes. For laserskanningsdata finnes en rekke verktøy for etterbehandling av ”rå” punktskyer, f.eks. bakke- og vegetasjonsfiltre. Ettersom det har vist seg at vegetasjon skaper endel problemer i høydedataene, vil det (f.eks. for produksjon av sanne ortofoto) kanskje være ønskelig å klassifisere og evt. filtrere vekk vegetasjonspunkter fra punktskyer fra bildematching, omtrent på samme måte som man gjør med dagens laserpunktskyer.¹⁸ Sammenliknet med laserpunktskyer har riktig nok punktskyene fra bildematching i utgangspunktet mindre informasjon som kan benyttes i filtrering av vegetasjon. Antallet bakkepunkter er færre, noe som gjør at etablering av hva som er terrengoverflate forvanskes. Litteraturen omkring klassifikasjon og filtrering av punktskyer fra bildematching er foreløpig nokså sparsom, men etter hvert som produktet blir mer utbredt, kan det nok forventes en kunnskaps- og teknologiutvikling spesielt rettet inn mot (etter)behandling av denne typen høydedata. I Nex & Remondino (2012) hevdes det at vegetasjon kan fjernes fra slike punktskyer bl.a. ved bruk av bildematerialet de er basert på; infrarøde bilder

¹⁸Dersom vegetasjonen fjernes fra høydedataene, vil trær naturligvis ikke rektifiseres i et (sant) ortofoto, men dersom man unngår problemene vegetasjon skaper, er det antakelig mulig å leve med dette. Hovedhensikten med sanne ortofoto er tross alt å gjengi bygninger uten effektene av radiell forskyvning.

er f.eks. særlig egnede til å detektere hvor vegetasjon befinner seg. Microsoft har i sin fotogrammetriske programvarepakke implementert en algoritme som også utnytter informasjonen fra flybildene til å filtrere ned en DOM fra tett bildematching til en DTM (Wiechert & Gruber 2010).

Et eksempel både på nødvendigheten av å bearbeide rådata fra tett bildematching, men også på anvendeligheten til disse dataene presenteres i Nex & Remondino (2012). Her hevdes det at fotogrammetriske DOM'er kan benyttes som inndata i generering av vektordata/3D-modeller av bygningsomriss/bygningstak. Punkttettheten til slike høydedata trekkes fram som en særlig gunstig egenskap for dette formålet. Her påpekes det, slik det også har blitt observert i denne undersøkelsen, at det ofte forekommer mange støypunkter i høydesprangene mellom bygningstak og bakke. Dette svekker kvaliteten på vektorekstraheringen. Forfatterne har imidlertid utviklet en algoritme som er i stand til å detektere og flytte støypunktene i bygningsperiferiene ned på bakkenivå, slik at bygningenes omriss defineres bedre. Ettersom det har blitt vist at utflytende grenser for bygninger er et problem for generering av sanne ortofoto, synes det som om en slik algoritme også kunne forbedret dette produktet. Med erfaringene fra herværende undersøkelse kan det kanskje innvendes at bygningsgrensene ofte er så svakt definert at fullautomatisk atskillelse av bygningspunkter og støypunkter synes meget vanskelig. Ikke desto mindre er denne undersøkelsen et interessant eksempel på at det finnes potensial for automatisert postprosessering og forbedring av høydedata fra tett bildematching, noe som videre kan gjøre dataene mer anvendelige.

6 Konklusjon

Resultatene fra denne oppgaven, der høydedata generert med digitale bilder med lav GSD og høy overlapp har blitt undersøkt, viser at siste generasjons programvare for bildematching er i stand til å hurtig produsere store mengder høydedata av relativt god kvalitet. Selv med bildeoverlapp på 60/20 kan det produseres høydedata med meget høy punkttetthet og få hull over normalt norsk bymiljø. Økning av overlapp til 60/60 viste seg å gi et datasett praktisk talt uten hull for samme område. Ved bruk av bildeoverlapp på 80/40 kan det oppnås en datadekning nærmest uten hull selv over overflater med høyt potensiale for dødvinke, som Oslo sentrum. Økt overlapp ga imidlertid ikke alltid flere produserte punkter når bildene som ble matchet ikke var fotografert omtrent samtidig. Den høye punkttettheten i data fra tett bildematching medfører at små detaljer som piper og takvinduer kan gjengis. Det har blitt vist ved kontroll mot GNSS-kontrollpunkter at høydenøyaktigheten kan være i samme størrelsesorden som GSD (som var ca. 6.5 cm i dette tilfellet), men undersøkelsene viser også at kvaliteten på høydedataene kan være lav, særlig i områder med lite bildetekstur. Dette innebærer blant annet at automatisert produksjon av sanne ortofoto med disse dataene synes problematisk; ortomosaikker vil inneholde mye feil selv ved 80% bildeoverlapp, dersom overflaten ikke er meget enkel. Sammenliknet med laserskanning synes den vertikale stedfestingskvaliteten til punktene i data fra tett bildematching å være svakere. Detaljerte flybilder og høydedata med meget høy punkttetthet og fullstendighet utgjør imidlertid en gunstig to-i-ett-løsning hva datainnsamling angår.

7 Appendiks

Utdrag fra e-postveksling mellom undertegnede og Inphos supportavdeling angående trappeeffektene i hellende overflater omtalt i seksjon 4.5.

————— Original Message —————

From: [andreas.woxholtt@terratec.no]

Sent: 08.04.2013 11:26

To: support@inpho.de

Subject: A few technical questions about Match-T DSM

To the technical support team of Inpho,

[...]

The first question concerns undulations I discovered in certain places in a height model derived from a Match-T point cloud. Please see the attached file "profile.jpg" [figur 35, forf. anm.] for an example. The profile runs over a slightly sloping gravel/asphalt surface, where such undulations should not occur. The point cloud was produced from imagery with high end lap (80%); thus the base line was rather short. (A point cloud produced from 60% end lap yielded similar wave-like structures, but the wave "amplitude" seemed smaller.) Also, the density of the point cloud was very high, about 1 point per pixel, as the parameter xy_factor in the MATCH.STATUS file was set to 1.0. It would be interesting to know what is causing these undulations.

[...]

—— Opprinnelig melding ——

Fra: Support@inpho.de" <support@inpho.de>

Til: "andreas.woxholtt@terratec.no" <andreas.woxholtt@terratec.no>

Dato: Mon, 8 Apr 2013 14:04:42 +0000 (GMT)

Emne: RE: A few technical questions about Match-T DSM

[...]

Concerning the steps in the profile - this is due to the resolution of the theoretical height accuracy of your data. As the CBM matching is a pixel based matching it does not search for features but uses a semi global matching approach and search

paths to determine the height for each pixel position. If the disparity map does not have content it will use the search paths to calculate for the position a height. In our approach we continue with the last known height information, therefore steps can occur. The steps are within your theoretical height accuracy and therefore we could of course smooth them, but it would not change the fact, that it misses height information, based of different issues (low texture in most cases).

[...]

Referanser

- Aerometrex (2011), 'Digital elevation, digital terrain or digital surface model?'. <http://aerometrex.com.au/blog/?p=89> (oppsøkt 02.02.12).
- Amhar, F., J. Jansa & C. Ries (1998), 'The generation of true orthophotos using a 3D building model in conjunction with a traditional DTM.', *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **32**(4), 16–22.
- Andersen, Ø. (1994), *Nye Bilde-tall-terreng*, NLH. 228 s.
- Andersen, Ø., G. Bråna & S. E. Lønnum (1991), *Fotogrammetri*, NKI. 299 s.
- Andersen, Ø. & I. Maalen Johansen (1998), *En innføring i digital fotogrammetri til kartleggingsformål*, NLH, Institutt for kartfag.
- Baltsavias, E. P. (1999), 'Airborne laser scanning: basic relations and formulas', *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **54**, 199–214.
- Baltsavias, E. P., A. Gruen, H. Eisenbeiss, L. Zhang & L. T. Waser (2008), 'High-quality image matching and automated generation of 3D tree models', *ISPRS Journal of Remote Sensing* **29**, 1243–1259.
- Barstad, B. (1998), 'Datafangst for terrengmodellering med digital fotogrammetri', Foredrag på Forum for fotogrammetri og fjernmåling 3. og 4. desember 1998.
- Birchfield, S. & C. Tomasi (1999), 'Depth discontinuities by pixel-to-pixel stereo', *Int. J. Comput. Vision* **35**, 269–293.
- Breidenbach, J. & R. Astrup, red. (2011), *Creation of Digital Elevation Models from Aerial Images for Forest Monitoring Purposes*, Report from Skog og landskap.
- DeVenecia, K., S. Walker & B. Zhang (2008), New approaches to generating and processing high resolution elevation data with imagery, i 'Photogrammetric Week '08', Universität Stuttgart, pp. 297–308.
- ESRI (2012), *Natural neighbor interpolation*. <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/005v000000270000000> (oppsøkt 17.04.13).
- Förstner, W. & E. Gülch (1987), A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centers of circular features, i 'Proceedings of the ISPRS Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data', pp. 281–305.

- Gehrke, S., K. Morin, M. Downey, N. Boehrer & T. Fuchs (2010), Semi-global matching: An alternative to LiDAR for DSM generation?, *i* ‘The 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I’, ISPRS.
- Günay, A., H. Arefi & M. Hahn (2007), Semi-automatic true orthophoto production by using LIDAR data., *i* ‘IGARSS 2007’, IEEE, pp. 2873–2876.
- Haala, N. (2009), Comeback of digital image matching, *i* ‘Photogrammetric Week ’09’, Universität Stuttgart, pp. 289–301.
- Haala, N. (2011), Multiray photogrammetry and dense image matching, *i* ‘Photogrammetric Week ’11’, Universität Stuttgart, pp. 185–195.
- Heuchel, T., A. Köstli, C. Lemaire & D. Wild (2011), Towards a next level of quality DSM/DTM extraction with Match-T, *i* ‘Photogrammetric Week ’11’, Universität Stuttgart, pp. 197–202.
- Höhle, J. & M. Höhle (2009), ‘Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods’, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **64**(4), 398–406.
- Hirschmüller, H. (2005), Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information, *i* ‘Proc. IEEE Conference on CVPR, New York’.
- Hirschmüller, H. (2006), ‘Stereo vision in structured environments by consistent semi-global matching’, *Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on* **2**, 2386–2393.
- Hirschmüller, H. (2008), ‘Stereo processing by semi-global matching and mutual information’, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **30**(2), 328–341.
- Hirschmüller, H. (2011), Semi-global matching – motivation, developments and applications, *i* ‘Photogrammetric Week ’11’, Universität Stuttgart, pp. 173–184.
- Hirschmüller, H. & T. Bucher (2010), ‘Evaluation of digital surface models by semi-global matching’, Rapport fremlagt på Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation-konferanse, Wien 2010.
- Inpho GmbH (2012a), *Match-T DSM 5.5 Reference Manual*.

- Inpho GmbH (2012b), *Release notes – Match-T DSM 5.5.0*. http://ecogis.pl/PDF/ReleaseNotes_MATCH-T_DSM_%28English%29.pdf (oppsøkt 19.02.13).
- Jacobsen, K. & A. Alobeid (2010), ‘Digital surface models in urban areas based on satellite imagery’, EARSeL Workshop, Gent, 2010.
- Kraus, K. (2007), *Photogrammetry. Geometry from Images and Laser Scans*, Walter de Gruyter. 459 s.
- Kraus, K. & J. Otepka (2005), DTM modeling and visualization – the SCOP approach, *i* ‘Photogrammetric Week ’05’, Herbert Wichmann Verlag, pp. 241–252.
- Leberl, F., A. Irchara, T. Pock, P. Meixner, M. Gruber, S. Scholz & A. Wiechert (2010), ‘Point clouds: Lidar versus 3D vision’, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **76**(10), pp. 1123–1134.
- Lemaire, C. (2008), Aspects of the DSM production with high resolution images, *i* ‘ISPRS Archives’, Vol. XXXVII, Part B4, pp. 1143–1146.
- Maune, D. F., red. (2007), *Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 655 s.
- McGlone, J. C., E. M. Mikhail, J. S. Bethel & R. Mullen, red. (2005), *Manual of Photogrammetry*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 1181 s.
- Mikhail, E. M., J. S. Bethel & J. C. McGlone (2001), *Introduction to Modern Photogrammetry*, J. Wiley & Sons. 479 s.
- Neumann, K. J. (2008), Trends for digital aerial cameras, *i* ‘International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Services, Vol. XXXVII’, ISPRS, pp. 551–554.
- Nex, F. & F. Remondino (2012), Automatic roof outlines reconstruction from photogrammetric DSM, *i* ‘ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, I-3’, ISPRS, pp. 257–262.
- Ok, Ö., J. D. Wegner, C. Heipke, F. Rottensteiner, U. Soergel & V. Toprak (2011), Reconstruction of line segments from UHR aerial image triplets, *i* ‘Photogrammetric Image Analysis’, Springer, pp. 61–72.

- Rothermel, M. & N. Haala (2011), Potential of dense matching for the generation of high quality digital elevation models, i 'ISPRS Hannover Workshop 2011: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information'.
- Scharstein, D. & R. Szeliski (2001), 'A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms', *International Journal of Computer Vision* **47**, 7–42.
- Schenk, T. (1999), *Digital Photogrammetry*, TerraScience. 428 s.
- Skog og landskap, Statens vegvesen, Statens kartverk (2013), *Norge i bilder WMS-tjeneste*. Tilgjengelig fra: http://www.statkart.no/nor/Land/Fagomrader/Norge_i_bilder (oppsøkt 05.02.2013).
- Statens kartverk (2009a), *Kart og geodata (standard)*, 2 versj.
- Statens kartverk (2009b), *Satellittbasert posisjonsbestemmelse*, 2.1 versj.
- Statens kartverk (2011a), *Produktspesifikasjon for ortofoto i Norge*, 4 versj.
- Statens kartverk (2011b), *Produktspesifikasjon Nasjonal modell for høydedata fra laserskanning (FKB-Laser)*, 1 versj.
- TerraTec AS (u. å.), *Om punkttetthet i laserskanning*. <http://terratec.no/doc/laser%20info.pdf> (oppsøkt 17.09.12).
- Wiechert, A. & M. Gruber (2010), DSM and true orthophoto generation with the Ultracam-L – a case study, i 'ASPRS 2010 Annual Conference', ASPRS.
- Wu, J. & S. Jie (2011), Building boundary improvement for true orthophoto generation by fusing airborne LiDAR data, i 'JURSE 2011', IEEE, pp. 2873–2876.
- Zandbergen, P. A. (2008), 'Positional accuracy of spatial data: Non-normal distributions and a critique of the national standard for spatial data accuracy', *Transactions in GIS* **12**(1), 103–130.
- Zhou, G., W. Chen, J. Kelmelis & D. Zhang (2005), 'A comprehensive study on urban true orthorectification', *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **43**(9), 2138–2147.
- ZI Imaging Corp. (2010), *Image Station Automatic Elevations User's Guide*.

Forkortelser og uttrykk

Forkortelse/uttrykk	Forklaring	Se seksjon
95 k	Absolutt 95%-kvan til en fordeling.	3.1.2
AT	Aerotriangulering	2.2.4
B/H	Basisforholdet eller basis/høydeforholdet.	2.2.2
DHM/DEM	Digital høydemodell/Digital elevation model	2.1
DOM/DSM	Digital overflatemodell/Digital surface model	2.1
DP	Dynamisk programmering (<i>Dynamic programming</i>)	2.3.5
DTM/DTM	Digital terrengmodell/Digital terrain model	2.1
EIHA	Estimated internal height accuracy	3.5
GSD	Ground sampling distance; arealet en piksel dekker på bakken.	2.2.3
MKM	Minste kvadrats matching	2.3.3
RMSE	Root mean squared error	3.1.2
90% RMSE	RMSE til de 90% av en fordeling som har minst feil/avvik.	3.1.2
95% RMSE	RMSE til de 95% av en fordeling som har minst feil/avvik.	3.1.2
SGM	Semi-Global Matching	2.3.5
Stripetvang	<i>Strip constraint</i> ; et bilde matches bare mot andre bilder fra samme flystripe.	3.5